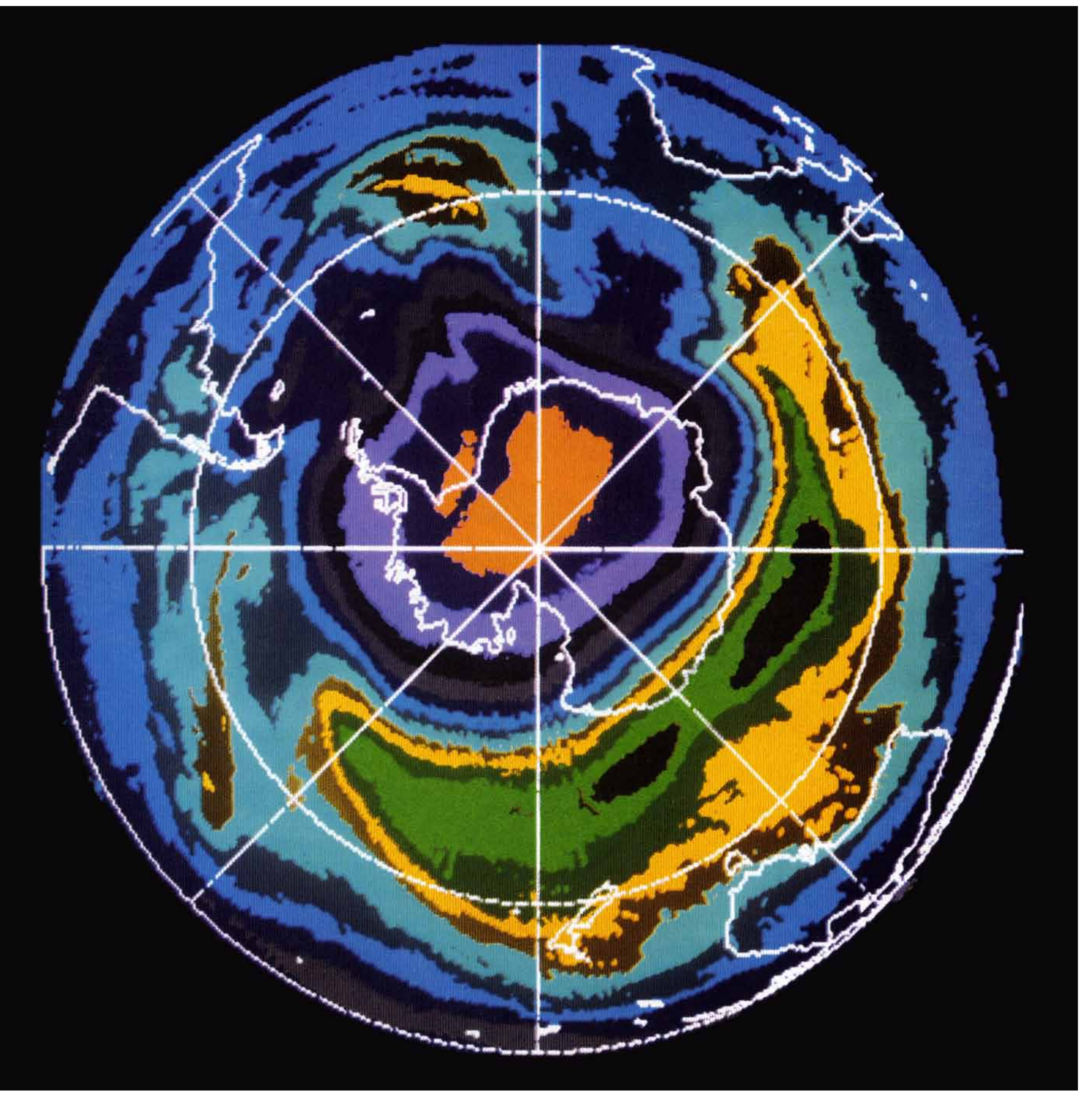
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



AGUJERO DE OZONO EN LA ANTARTIDA

Marzo 1988
450 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

INVESTIGACION Y
CIENCIA

Apuntes

Uno de los principales descubrimientos de los últimos años ha sido el relativo a los superconductores a altas temperaturas. Ante las posibilidades comerciales que ofrecen esos portadores de corriente eléctrica sin resistencia, se ha establecido en Japón el primer Centro Internacional de Tecnología de la Superconducción.

En Japón también, y por investigadores de la empresa Sumitomo, de suministros electrónicos, se ha desarrollado un monocristal de capa fina por el que puede cicular una corriente máxima de 2,5 millones de ampère por centímetro cuadrado a la temperatura del nitrógeno líquido. La densidad de corriente de este superconductor, formado por óxidos de holmio-bario-cobre, es la mayor de que se tiene noticia hasta ahora, se mantiene en campos magnéticos intensos y ha persistido durante un mes.

El antepasado común a todos los organismos podría ser un eocito. Así se llama el grupo de células carentes de núcleo, termofílicas en grado sumo y metabolizadoras del azufre. Las pruebas en que se apoya esa afirmación pertenecen a la nueva ''paleontología'': la que reconstruye el árbol filogenético a través del análisis del ADN.

Y hablando de rastreo de antepasados por ADN, la cartografía del gen de la globina en el hombre, el chimpancé, el gorila y el orangután ha puesto de manifiesto que nuestro parentesco con el chimpancé es mucho más estrecho que el que nos liga con los demás primates.

El estado indio de Maharashtra ha prohibido las pruebas de determinación del sexo en las mujeres embarazadas. El ministro S. B. Chavan lo justificó aduciendo la profunda preocupación por el abuso de ese ensayo utilizado para provocar abortos de embriones femeninos. La medida afecta sólo a los laboratorios y hospitales privados.

Varios son los proyectos nacionales e internacionales para remedar, en el ordenador, el procesamiento neural de la información. Estados Unidos se halla a la cabeza, con casi tres mil investigadores; le sigue la Comunidad Económica Europea y, en tercer lugar, Japón. Aunque Alemania participa ya en el programa comunitario BRAIN (que significa cerebro y responde a las iniciales, en versión inglesa, del nombre del proyecto: Investigación básica en inteligencia adaptativa), ha incoado uno propio: el BMFT, con la doble finalidad de aprovechar el conocimiento del funcionamiento del cerebro para aplicarlo al diseño de ordenadores y crear robots inteligentes, capaces de ver, oír, escribir, hablar y relacionarse con el medio.

El cuco, que pone sus huevos en nidos ajenos, tiene muchos imitadores entre las aves. Algunas superan su habilidad en esa forma de parasitar el esfuerzo reproductor. Ciertas golondrinas, para conseguir mejores cuidados, los cambian de nido antes de la eclosión.

Las condritas carbonáceas son los meteoritos de mayor antigüedad conocida. De acuerdo con recientes análisis espectrométricos de Elektra 130 y de meteoritos condríticos, los asteroides constituirían, a su vez, el origen de las condritas. Y como éstas, podrían presentar materia orgánica.

Contra lo que viene afirmándose, los astrónomos y físicos medievales no se imaginaron las esferas celestes como algo rígido. Esa creencia es netamente copernicana y renacentista. Para los medievales, las órbitas eran de carácter fluido.

INVESTIGACION Y CIENCIA

Marzo de 1988 Número 138

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

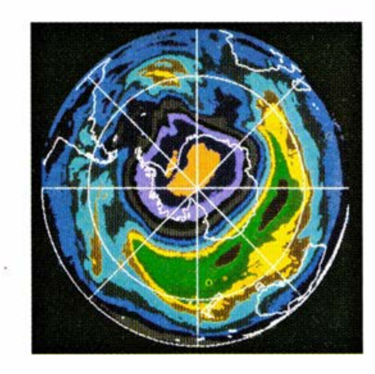
Manuel Puigcerver: *El agujero de ozono de la Antártida*; Santiago Torres Martínez: *Células asesinas*; Ramón Pascual: *Realidad del mundo cuántico*; Joandomènec Ros: *Peces intermareales*; Josep Mas: *Tierras no tan raras*; José Manuel García de la Mora: *Arte, ilusión y sistema visual*; Juan-Pedro Adrados: *El transformador*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio*.

Libros:

Bermudo Meléndez, Eugenio Portela, Antonio Escarré y Cecilio Giménez

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
13	NASA
14-17	George V. Kelvin, Science Graphics
18	Mark Muller, Fundación Nacional estadounidense de la Ciencia (*arriba*), George V. Kelvin (*abajo*)
20-21	Gilla Kaplan, Universidad Rockefeller
22-23	John Ding-E Young, Universidad Rockefeller
24-25	Dana Burns
26	Dana Burns (*arriba*), Gilla Kaplan (*abajo*)
29	Roger Gérard, Institut d'Optique Théorique et Appliquée
30-35	Gabor Kiss
41-42	M. Nieto y Ricardo Génova
43	Clark Caskey Speidel, Universidad de Virginia
44-48	M. Nieto y Ricardo Génova
51	Tom Prentiss
52	Anne Wertheim
53	Anne Wertheim (*arriba*), Michael H. Horn (*abajo*)
54-57	Tom Prentiss
59-62	Ian Worpole
63	Gunter K. Muecke y Peter Möller (*arriba*), Ian Worpole (*centro y abajo*)
65	Margaret S. Livingstone
66	Patricia J. Wynne
67	Richard MacDonald (*arriba*), Margaret S. Livingstone (*abajo*)
68	David H. Hubel
69	The Bettmann Archive
70	Richard MacDonald
71	Museo de Arte de Baltimore: Colección Cone, formada por Dr. Claribel Cone y Miss Etta Cone, de Baltimore, Maryland (*arriba*); Patricia J. Wynne (*abajo*)
75	James Kilkelly
76-77	Hank Iken
78	Westinghouse Electric Corporation
79-81	Hank Iken
85	Carol Donner
86-87	Andrew Christie
90-93	Michael Goodman



LA PORTADA muestra un mapa, creado con datos obtenidos por satélite, de los niveles de ozono en la atmósfera sobre el hemisferio Sur el 15 de octubre de 1987 (véase "El agujero de ozono de la Antártida", por Richard S. Stolarski, en este mismo número). La zona anaranjada corresponde al núcleo de la región mermada de ozono, el "agujero" detectado en la primavera antártica durante los últimos años. Recientes estudios apoyan la hipótesis de que ciertas substancias químicas cloradas contribuyen a su aparición, pero parecen también estar implicados otros factores.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
REDACCIÓN Carlos Oppenheimer, Josep Maria Farré Josa
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
PROMOCIÓN EXTERIOR Pedro Clotas Cierco
EDITA Prensa Científica, S. A. Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona (ESPAÑA)

SCIENTIFIC AMERICAN

DIRECTOR EDITORIAL Jonathan Piel
REDACCIÓN Armand Schwab, Jr. (Subdirector), Timothy Appenzeller, Timothy M. Beardsley, John M. Benditt, Laurie Burnham, David L. Cooke, Jr., Ari W. Epstein, Gregory R. Greenwell, John Horgan, June Kinoshita, Ricki L. Rusting, Karen Wright
DIRECTOR ARTÍSTICO Samuel L. Howard
DIRECTOR DE PRODUCCIÓN Richard Sasso
PRESIDENTE HONORARIO Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	4950	9000
Extranjero	5500	10.000

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 450 pesetas
Extraordinario: 575 pesetas

- Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.
- En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.
- El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel.652 42 00

para los restantes países:

Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona
Teléfono 322 05 51

PUBLICIDAD

Madrid: Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Teléfonos 409 70 45 - 409 70 46

Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Muntaner, 467-469, 3º 3ª
08021 Barcelona
Teléfono 211 92 45



ISSN 0210-136X Dep. legal: B. 38.999-76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona

Fotocromos reproducidos por Reprostudy, S. A. Buenos Aires, 51 - 08902 Hospitalet (Barcelona)

Gráfica Elzeviriana, S. A. Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11 - 08013 Barcelona

Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

RICHARD S. STOLARSKI ("El agujero de ozono de la Antártida") investiga sobre dinámica y química atmosférica en el Centro de Vuelos Espaciales Goddard de la Administración Nacional estadounidense de Aeronáutica y del Espacio (NASA). Tras doctorarse en física por la Universidad de Florida en 1966, aceptó una plaza de investigador en la Universidad de Michigan, que dejó en 1974 para ingresar en el Centro Espacial Johnson de la NASA, en calidad de físico investigador. Stolarski se trasladó a Goddard en 1976; desde 1979 hasta 1985 dirigió la división de química atmosférica y dinámica.

JOHN DING-E YOUNG y ZANVIL A. COHN ("Células asesinas") trabajan juntos en el laboratorio de fisiología celular e inmunología de Cohn, en la Universidad Rockefeller. Young, que es profesor de la Rockefeller, nació en Taiwan, tiene nacionalidad brasileña y permiso de residencia permanente en Estados Unidos. Licenciado en medicina en 1979 por la Universidad Nacional de Brasilia, se doctoró por la Rockefeller, donde estuvo dos años como becario antes de acceder, en 1985, a su cargo actual. Cohn es médico y profesor de la Rockefeller; da clases también en la Facultad de Medicina de la Universidad de Cornell. Licenciado por Harvard en 1953, realizó la residencia y el internado en el Hospital General de Massachusetts. Dirigió la división de biología de rickettsias del Instituto Walter Reed del Ejército, trasladándose en 1958 a la Universidad Rockefeller. Cohn fue codirector, entre 1973 y 1978, del programa conjunto de licenciatura y doctorado de Rockefeller y Cornell.

ABNER SHIMONY ("Realidad del mundo cuántico") enseña filosofía y física en la Universidad de Boston. Licenciado (1947) y doctor (1953) en filosofía por la Universidad de Yale, se recibió de doctor en física (1962) por la de Princeton. Enseñó en el Instituto de Tecnología de Massachusetts hasta 1968 y ha dado clases en la Universidad de París (Orsay), Mount Holyoke College y el Instituto Politécnico de Zurich. Shimony está especializado en los fundamentos de la mecánica cuántica y se interesa en particular por el diseño de experimentos que prueben cuestiones del dominio de la filosofía. Colaborador del movimiento pacifista, es autor de poemas y obras ligeras, algunas de ellas sobre temas de física.

MANUEL NIETO SAMPEDRO ("Plasticidad sináptica") es profesor en el departamento de psicobiología de la Universidad de California en Irvine, al que pertenece desde 1978. Licenciado en ciencias químicas por la Universidad de Madrid, se doctoró en bioquímica en el National Institute for Medical Research de Londres en 1971. Su interés en la reparación del cerebro y médula espinal lesionados le han conducido al estudio de los procesos responsables de la plasticidad del sistema nervioso central.

MICHAEL H. HORN y ROBIN N. GIBSON ("Peces intermareales") han trabajado juntos en el Mediterráneo y en las costas atlánticas francesas. Horn es profesor de biología de la Universidad estatal de California en Fullerton. Se licenció por la Universidad de Oklahoma en 1965 y se doctoró por la de Harvard en 1969, trasladándose a Fullerton después de un año de postdoctorado en la Institución Oceanográfica Woods Hole y en el Museo Británico (Historia Natural). Gibson, investigador principal de la Asociación Escocesa de Biología Marina en Oban, se doctoró en 1965 por la Universidad de Gales y allí se interesó por los peces intermareales cuando era alumno de licenciatura. Ha proseguido sus estudios ictiológicos en Europa y en Oriente Medio, con campañas esporádicas en el Pacífico.

GUNTER K. MUECKE y PETER MÖLLER ("Tierras no tan raras") colaboran desde 1983 en el estudio de la distribución y movilidad de los elementos trazadores, entre ellos las tierras raras. Muecke es profesor en los departamentos de geología y estudios ambientales de la Universidad de Halifax. Tras licenciarse en geología por la Universidad de Alberta, en 1964, se doctoró por la de Oxford en 1969, partiendo para Dalhouise al año siguiente. Muecke ha sido también investigador visitante en la Universidad de Göttingen y en el Instituto Hahn-Meitner de Estudios Nucleares, de Alemania Federal. Möller es un renombrado investigador del Instituto Hahn-Meitner. Se recibió de doctor en química nuclear en 1967 por la Universidad Técnica de Berlín y, al poco tiempo, empezó a ejercer de profesor en ella y en la Universidad Libre de Berlín. Sigue dando clases en ambas instituciones.

MARGARET S. LIVINGSTONE ("Arte, ilusión y sistema visual") es profesora de neurobiología de la Facultad de Medicina de Harvard. Tras cursar el primer ciclo universitario en el Instituto de Tecnología de Massachusetts entró en la Facultad de Medicina de Harvard, pero optó luego por seguir el segundo ciclo y doctorarse en neurobiología, en 1980. Desde 1979 ha colaborado con David H. Hubel, de la Facultad de Medicina, en el estudio del procesamiento de la información visual por los seres humanos y otros primates. Ha investigado también las funciones de las neurohormonas en el comportamiento de la langosta y los fundamentos bioquímicos del aprendizaje por asociación en *Drosophila melanogaster*, la mosca del vinagre.

JOHN W. COLTMAN ("El transformador") fue, hasta su jubilación, director de investigación y desarrollo de los laboratorios de investigación de la Westinghouse Electric Corporation. Es más conocido por inventar y desarrollar el amplificador de imágenes de rayos X, un artilugio habitual hoy en día en los departamentos hospitalarios de radiología. Coltman se licenció en física por el Instituto Case de Tecnología (1937), doctorándose en física nuclear por la Universidad de Illinois en 1941. Ingresó en la Westinghouse, donde investigó sobre tubos de microondas para radar y para perturbación de radares enemigos. En 1949 fue nombrado director del departamento de electrónica y física nuclear. Ocupó otros dos cargos antes de aceptar su último nombramiento en 1974. Coltman, que dejó la Westinghouse en 1980, es flautista y ha publicado diversos artículos sobre acústica.

Cartas

Señor director,

El excelente artículo de Charles H. Bennett "Demonios, motores y la segunda ley" [INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1988] me incita a sugerir un posible demonio. Acepto de antemano que en mi argumentación haya algún fallo, aunque no puedo apreciarlo.

Consideremos una esfera hueca, cuya superficie interior sea perfectamente reflectante. En el centro hay una bola negra. La temperatura de la bola permanece invariable, pues toda la radiación que ésta emite se refleja en la superficie de la esfera y regresa a la bola.

Supongamos un elipsoide hueco con la superficie interior perfectamente reflectante, también, y con dos bolas negras situadas en los dos focos. Toda la radiación que emite una bola se refleja en la superficie y llega hasta la otra bola. La temperatura de las bolas es constante y la misma en ambas.

Consideremos ahora una estructura compuesta: el elipsoide hueco, se corta por un extremo donde se une con una esfera hueca, montada de suerte que su centro constituya un foco del elipsoide. Se colocan sendas bolas negras en cada foco. Toda la radiación que proviene del foco del interior del elipsoide se refleja hacia el otro foco; en cambio, la mayor parte de la radiación que se produce desde este punto (el centro de la esfera) se vuelve a reflejar hacia él mismo. De esta forma se establece un flujo neto de energía desde el primer foco hacia el segundo.

TONY GREENFIELD

Whitwell, Hertfordshire
Inglaterra

Señor director,

Como explica correctamente Bennett, la segunda ley de la termodinámica es la expresión de la pequeñísima probabilidad que existe de que se produzcan sucesos como la formación de un flujo de calor desde zonas frías hacia zonas cálidas de un sistema. La probabilidad, mínima, de que este acontecimiento hipotético tenga lugar a escala macroscópica convierte la segunda ley en una aseveración de imposibilidad. Ahora bien, cuando ocurren esos sucesos en escala menor, su probabilidad suele ser mayor; en el nivel atómico las desviaciones del promedio constituyen la regla. En este nivel, no pueden sorprendernos las violaciones de la segunda ley en su expresión más sencilla, y los mecanismos (llamémosles "demonios") que a partir de las fluctuaciones desencadenaran cambios "antinaturales" no plantearían ningún conflicto con ningún principio fundamental.

No es preciso, desde ese punto de vista estadístico, rechazar tajantemente la presencia de los "demonios"; parecería más natural intentar calcular qué es lo que pueden hacer. El demonio original, por ejemplo, que trabaja controlando la puerta que separa dos habitaciones, podría sufrir las limitaciones que se nos describen en el artículo, pero antes de que estas limitaciones se manifiesten se habrá emcontrado con otras dificultades. La probabilidad de encontrar una molécula caliente que pueda pasar a la zona deseada sin que se le escape otra aún más caliente resulta progresivamente menor. Esta dificultad determinaría, al menos aproximadamente, qué diferencia de temperaturas sería capaz de producir el demonio en una determinada cantidad de gas, o, a la inversa, para qué cantidad de gas puede producirse una determinada diferencia de temperaturas.

LESTER GUTTMAN

Chicago, Illinois

Señor director,

La ingeniosa modificación de Bennet del motor de Szilard [enero de 1988, página 60] desnaturaliza, según mi opinión, su exorcismo del demonio de Maxwell. Para restablecer la posición neutra del pasador (borrando la información acerca de la localización de la molécula) hay que ejecutar las mismas operaciones que las necesarias para guardar la información; si esta última operación puede hacerse con un trabajo despreciable, ¿por qué no la primera?

HARRY G. PARKE

Brooklyn, Nueva York

Señor director,

En el interesante artículo de Bennett acerca del exorcismo del demonio de Maxwell parece que su argumentación se ha saltado un paso. Una vez que el motor de Szilard –una versión del demonio– ha extraído trabajo de la molécula que está en el interior del cilindro, todo este trabajo se necesita para reinicializar la memoria de la máquina. Que la reinicialización de la memoria requiere trabajo es algo obvio; no lo es tanto que requiera el mismo trabajo como el que se obtiene de la expansión del cilindro. Más aún, diríase que no. Supongamos que el cilindro contiene dos o tres moléculas, y que esperamos hasta que todas están en uno de los lados de la división antes de cerrar la puerta. El tiempo de espera y la medida no cuestan nada. El trabajo obtenido de la expansión es mayor que el que se obtiene cuando había una sola molécula en el cilindro, y, sin embargo, reinicializar la memoria no cuesta más que antes.

MICHAEL P. SULZER

Arecibo, Puerto Rico

Señor director,

Una crítica común, ante la que poco puedo defenderme, es la de haber caído en un razonamiento circular, usando la segunda ley para probar la segunda ley. Los intentos de entender la segunda ley siempre han sido algo tautológicos. Su principal virtud es que robustecen la confianza en la coherencia de la ley y en la inviabilidad de los ingenios que a primera vista parecen violarla. De hecho, los lectores sugieren varios dispositivos convencidos por lo común de que no funcionan.

En la carta de Tony Greenfield, por ejemplo, se describe una cavidad reflectora que parece dirigir la radiación preferentemente desde un cuerpo (A, en la cavidad elipsoidal) hacia otro (B, situado en la esfera), violando la segunda ley. Sin embargo, incluso en una cavidad elipsoidal, se pierde una fracción significativa de la radiación emitida por un cuerpo cuando no va exactamente hacia el otro, sino que experimenta múltiples reflexiones y regresa al foco original. Esto ocurre porque los cuerpos situados en los focos no son meros puntos, sino que tienen un radio finito. En la cavidad compuesta, donde se ha eliminado parte del elipsoide, hay una fracción mayor de radiación emitida por A que no llega a B y que regresa a A. En contraste, una fracción

escasa, si alguna, de la radiación emitida en B (dependiendo de la forma exacta de la cavidad compuesta) experimenta múltiples reflexiones. Casi toda la radiación se refleja sólo una vez hacia A en el elipsoide o hacia B en la esfera. Del análisis se desprende que la fracción de radiación emitida por A que regresa a A (por medio de reflexiones múltiples) iguala exactamente la fracción emitida por B que regresa a B (por medio de una única reflexión en la esfera), cumpliéndose la segunda ley.

En la carta de Guttman se hace notar que ocurren espontáneamente violaciones microscópicas de la segunda ley; sugiere, por consiguiente, que nada extraordinario ocurre si un demonio produce una pequeña diferencia de temperaturas en un pequeño sistema que contiene pocas moléculas. Esto es cierto sólo si el demonio no es capaz de producir una diferencia en la temperatura *promedio* entre dos zonas del sistema pequeño. Si el demonio produce una diferencia de la temperatura promedio, esa misma diferencia podría transportarse hacia dos cuerpos macroscópicos que se hallaran en contacto térmico con las dos partes del sistema pequeño, resultando en una violación importante de la segunda ley.

La carta de Harry Parke sugiere que la colocación del pasador en la posición neutra no requiere más trabajo que las otras operaciones que se mostraron en la página 66. Los mismos argumentos han sido empleados por otros lectores. La verdad es que esta operación requiere más trabajo porque es lógicamente irreversible, ya que comprime dos estados del aparato en uno solo. Todas las demás operaciones son lógicamente reversibles. Otros lectores sugieren que el estado neutro debe omitirse por entero y que cada nueva medida se reescriba en el valor (I o D) antiguo. Según este esquema, se evita el borrado, pero la operación de medición pasa entonces a ser irreversible desde el punto de vista lógico, lo que no se debe tanto a la adquisición de nueva información cuanto la destrucción concomitante de la información preexistente.

Algunos lectores proponen que, modificando la escala del motor de Szilard o usando una molécula más pesada, se obtendría una producción de trabajo mayor, pero esto no es cierto. El trabajo producido es independiente de estos parámetros porque la velocidad browniana de una molécula está en relación inversa a la raíz cuadrada de su masa, y la presión de un gas varía inversamente con el volumen del cilindro que llena.

La carta de Michael Sulzer presenta una forma más eficaz de aumentar el trabajo producido: introducir varias moléculas en el cilindro en vez de una sola y esperar que todas se alojen en una zona del cilindro. Otros lectores redescubrieron una idea afín a la de Denis Gabor. Gabor mantenía que esperando a que cada molécula entre en un pequeño volumen, encerrándola allí, y permitiendo su expansión en otro volumen mucho mayor, se obtendría una producción de trabajo arbitrariamente grande (proporcional al logaritmo del cociente entre los volúmenes). De modo distinto que en el motor de Szilard, cada uno de estos motores de "alto rendimiento" debe esperar que ocurra un suceso improbable antes de realizar la carrera de potencia. Ocurre, por consiguiente, que el propio hecho de esperar tiene un costo termodinámico que compensa el trabajo extra obtenido.

¿Por qué la espera para que ocurra un suceso poco probable cuesta energía? ¿Podría crearse una suerte de ratonera, que no consume energía mientras se aguarda el momento del suceso deseado, utilizando entonces una cantidad fija de energía independiente de la duración de la espera? No: cuanto más infrecuente es el suceso, mayor energía ha de emplearse para atraparlo. La razón estriba en que una trampa, como cualquier otro dispositivo supuestamente irreversible, ofrece alguna probabilidad de funcionar a la inversa: de abrirse espontáneamente bajo la influencia del movimiento browniano y dejar que el ratón retenido (o molécula) se escape. Estas fugas espontáneas se hacen menos frecuentes cuanto más firme es el muelle de la trampa, pero no pueden evitarse del todo. Para que el motor de Szilard de alto rendimiento funcione como se pretende, la frecuencia de las fugas espontáneas debe ser menor que la frecuencia de las capturas, de forma que se requiere un muelle tan fuerte que todo el incremento del trabajo del motor que se obtiene se emplea en devolverlo a su posición inicial.

Varios lectores han propuesto dispositivos que convertirían el movimiento aleatorio de las moléculas en el movimiento recíproco al azar del émbolo del pistón. Sin embargo, este movimiento al azar en una dimensión no es más útil, mecánicamente, que el movimiento browniano, aleatorio y tridimensional, de la molécula de la que se ha obtenido.

CHARLES H. BENNETT

Hace...

José M.ª López Piñero

...cuatrocientos años

Murió Nicolás Bautista Monardes, máximo estudioso de la materia médica americana durante el siglo XVI.

Nacido en Sevilla hacia 1493, Monardes estudió en la Universidad de Alcalá, donde obtuvo los grados de bachiller en artes y filología (1530) y de bachiller en medicina (1533). Allí recibió la influencia de la corriente encabezada por Elio Antonio de Nebrija, aunque el gran humanista no fue profesor suyo. En 1547 se doctoró en la Universidad de Sevilla, ciudad en la que permaneció hasta su muerte, a muy avanzada edad. Además de ejercer la medicina con gran prestigio y notables ingresos, participó en empresas mercantiles, entre ellas el comercio de materias medicinales y el tráfico de esclavos.

Monardes publicó numerosas obras. La primera de ellas, *Diálogo llamado pharmacodilosis* (1536), refleja, como ha aclarado Pérez Fuenzalida, su adscripción a la corriente humanística. Atribuye a los árabes la decadencia de la botánica y de la materia médica y recomienda el estudio directo de los clásicos, especialmente de Dioscórides, en la misma línea de Nebrija. Parecida orientación tiene su segundo libro (1539), que trata de la sangría en el "mal de costado", tema entonces de una agria polémica entre los seguidores de la tendencia humanística y la arabizante. En fechas posteriores, publicó un estudio sobre las rosas y los frutos cítricos (ca. 1540), una traducción de la *Sevillana Medicina* (1545) del judío bajomedieval Juan de Aviñón, una monografía sobre la nieve (1571) y el *Diálogo del hierro* (1574) al que después nos referiremos. Su libro más importante fue, sin embargo, el que en su primera edición completa se tituló *Historia Medicinal de las cosas que se traen de nuestras Indias Occidentales* (1574). Consta de tres partes, la primera de las cuales había aparecido en 1565 y la segunda en 1571.

Monardes tuvo clara conciencia del servicio que prestaba al dedicar largos años a la preparación de esta obra. En el prefacio de su primera parte, tras enumerar la "riqueza increíble" que viene del Nuevo Mundo en oro y plata, piedras preciosas, perlas, animales, "lana, algodón, grana para teñir, cueros, azúcares, cobre, brasil y ébano", afirma que todavía más valiosas son "las cosas que traen de nuestras Indias Occidentales que sirven en medicina". Por ello, se propuso estudiarlas, "de lo cual seré el primero, para que los demás añadan con este principio lo que más supieren y por experiencia más hallaren". Como Sevilla, prosigue, "es puerto y escala de todas las Indias Occidentales... púdelo hacer, juntamente con la experiencia y uso de ellas de cuarenta años que ha que curo en esta ciudad, donde me he informado de los que de aquellas partes las han traído con mucho cuidado y las he experimentado".

El médico sevillano no era un observador ocasional ni un autodidacta, sino un científico sólidamente formado y con amplia experiencia en el estudio de la naturaleza. Cultivó plantas americanas en el huerto de su casa y aprovechó las colecciones y jardines que existían entonces en Sevilla, entre ellos el museo de Gonzalo Argote de Molina y quizá también el jardín botánico de Simón Tovar. Describió por vez primera, según Francisco Guerra, varias especies vegetales, como el carlo santo (*Argemone mexicana*), la cebadilla (*Sabadilla officinarum*), la jalapa (*Exogonium purga*) o el sasafrás (*Sassafras officinale*), pero, sobre todo, ofreció las primeras descripciones detalladas y correctas de otras muchas. Por ejemplo, se consideran clásicas las que dedicó al tabaco —del que publicó el primer grabado— y de los bálsamos medicinales más importantes: el llamado del Perú (*Myroxylon pereirae*) y el de Tolú (*Myroxylon toluifera*). Familiarizó también a los europeos con otras plantas de gran importancia dietética o medicinal, como el maíz, la piña tropical, el cacahuete, la batata, la zarzaparilla o la coca. Mucho más escasas son sus referencias a especies animales, una de las cuales está dedicada al armadillo, sobre la base de un ejemplar vivo que poseía Argote de Molina. Entre las que consagra a minerales destacan las correspondientes al ámbar, al azufre procedente de Quito y Nicaragua y al origen del bitumen y del petróleo.

El aspecto más brillante de su obra es, sin embargo, su contribución a la farmacognosia. "Monardes —afirma Guerra— rebasa el antiguo concepto de los herbarios tradicionales para ahondar en el origen y caracteres de identificación, además de los usos de los materiales americanos, apuntando la similitud y diferencias con los productos de la farmacia clásica". A ello se debe que, desde el ya clásico *Handbuch der Pharmakognosie* (1933) de Alexander Tschirch, se le considere, junto a Valerius Cordus y a Charles de l'Escluse (Clusius), como uno de los "padres" de esta ciencia.

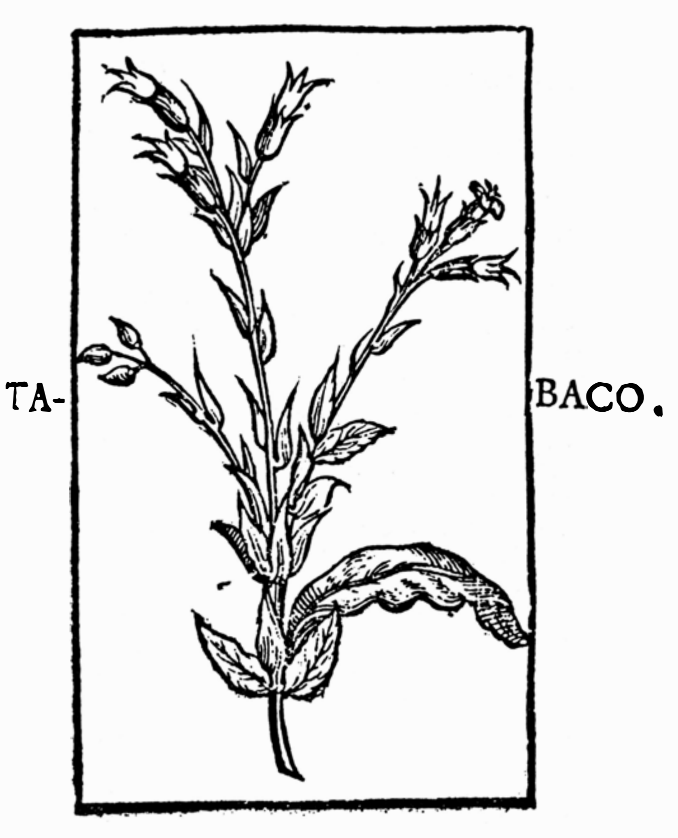
El principal interés del *Diálogo del hierro* (1574), que antes hemos citado, reside en que fue el primer libro consagrado a un tema que no volvería a ser tratado monográficamente hasta comienzos del siglo XVIII. Monardes defiende en él la importancia del hierro para la cultura humana, contraponiéndolo a la inmoderada ambición que despertaban los metales preciosos. La exposición se hace en forma de un diálogo entre el propio autor, el boticario Bernardino de Burgos —personaje real según Francisco Guerra— y un metalurgista vizcaíno llamado Ortuño. En boca de este último se pone la descripción de los principales yacimientos europeos y españoles, así como de las técnicas de labrado del hierro y de la fabricación del acero. Sin demasiada profundidad, se recogen principalmente los métodos habituales en las famosas "ferrerías" del País Vasco. El libro se ocupa igualmente de la génesis del hierro, de sus cualidades y de sus aplicaciones terapéuticas, con un enfoque propio de la cultura académica de la época.

Las obras de Monardes se encuentran entre los textos científicos del siglo XVI que más interés despertaron en la Europa de la época. En poco más de cien años, alcanzaron cuarenta y dos ediciones en seis idiomas. A esta difusión contribuyeron de modo decisivo las traducciones latinas, resumidas y comentadas, que realizó el propio Clusius.

Como muestra de la *Historia Medicinal* de Monardes ofrecemos a continuación su capítulo inicial y unos fragmentos relativos al tabaco:

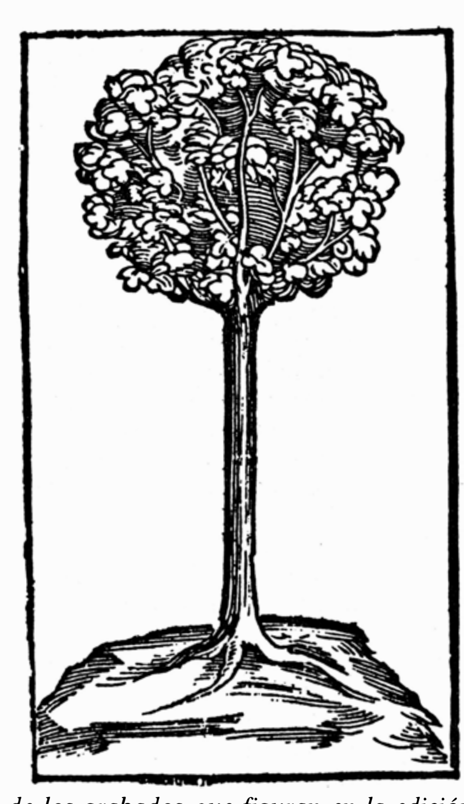
"En el año mil cuatrocientos noventa y dos fueron nuestros españoles, guiados por Cristóbal Colón, natural de Génova, a descubrir las Indias Occidentales, que hoy llaman Nuevo Mundo, y descubrieron las primeras el once de octubre del mismo año, y desde entonces hasta ahora se han descubierto muchas y varias islas, y mucha tierra firme, así en lo que llaman Nueva España como en lo que llaman Perú, do hay muchas provincias, muchos reinos, muchas ciudades, que tienen varias y diversas costumbres, en las cuales se han hallado cosas que jamás en estas partes ni en otra del mundo han sido vistas ni hasta hoy sabidas, y otras que si las tenemos en estas partes, exceden en la mucha abundancia que de ellas nos traen. Así como oro, plata, perlas, esmeraldas, turquesas y otras piedras





EL ARMADILLO.

EL SASSAFRAS.





Cuatro de los grabados que figuran en la edición sevillana de 1580 de la Historia Medicinal de las cosas que se traen de nuestras Indias Occidentales, *de Nicolás Monardes: retrato del autor e ilustraciones de los capítulos sobre el tabaco, el sasafrás y el armadillo*

finas de gran valor, que si acá teníamos alguna parte de ellas, es grande el exceso y cantidad que ha venido y cada día viene, en especial del oro y plata, que es cosa de admiración la gran suma de millones que han venido de ello, sin las muchas perlas, que han henchido a todo el mundo.

"Traen de aquellas partes, asimismo, papagayos, monos, grifos, leones, gerifaltes, neblíes, azores, tigres, lana, algodón, grana para teñir, cueros, azúcares, cobre, brasil, ébano, azul, y de todo ello en tanta cantidad que vienen cada año casi cien naos cargados de ello, que es cosa grande y riqueza increíble.

"Allende de estas riquezas tan grandes, nos envían nuestras Indias Occidentales muchos árboles, plantas, hierbas, raíces, zumos, gomas, frutos, simientes, licores, piedras que tienen grandes virtudes medicinales, en las cuales se han hallado y hallan muy grandes efectos que exceden mucho en valor y precio a todo lo susodicho, tanto cuanto es más excelente y necesaria la salud corporal que los bienes temporales; de las cuales cosas todo el mundo carecía, no sin pequeña falta nuestra, según los grandes provechos que vemos que del uso de ellas se consigue, no sólo en nuestra España, pero en todo el mundo.

"Y esto no es de maravillar que así sea; como dice el filósofo (Aristóteles), no todas las tierras dan iguales plantas y frutos, porque una región que en Creta solamente nace el díptamo, y el incienso en toda la región de Saba, y el almácigo en sólo la isla de Chío, y la canela y el clavo y la pimienta y otras especias sólo en las islas de Maluco, y otras muchas cosas hay en diversas partes del mundo que no han sido conocidas hasta nuestros tiempos, que los antiguos carecieron de ellas, y el tiempo, que es descubridor de todas las cosas, nos las ha demostrado con mucho provecho nuestro, viendo la necesidad que teníamos de ella.

"Y así como se han descubierto nuevas regiones y nuevos reinos y nuevas provincias por nuestros españoles, ellos nos han traído nuevas medicinas y nuevos remedios con que se curan y sanan muchas enfermedades que, si careciéramos de ellos, fueran incurables y sin ningún remedio. Las cuales cosas, aunque algunos tienen noticia de ellas, no son comunes a todos, y por esto propuse tratar y escribir todas las cosas que traen de nuestras Indias Occidentales que sirven al arte y uso de la medicina para remedio de los males y enfermedades que padecemos; de que no pequeña utilidad y provecho se consigue a los de nuestros tiempos, y también a los que después de nos vinieron; de lo cual seré el primero, para que los demás añadan con este principio lo que más supieren y por experiencia más hallaren.

"Y como en esta ciudad de Sevilla, que es puerto y escala de todas las Indias Occidentales, sepamos de ellos más que en otra parte de toda España, por venir todas las cosas primero a ella, donde con mejor relación y con mayor experiencia se saben. Púdelo hacer, juntamente con la experiencia y uso de ellas de cuarenta años que ha que curo en esta ciudad, donde me he informado de los que de aquellas partes las han traído con mucho cuidado y las he experimentado con muchas y diversas personas, con toda diligencia y miramiento posibles, con felicísimos sucesos"...

"Esta hierba que comúnmente llaman tabaco es hierba muy antigua y conocida entre los indios, mayormente entre los de Nueva España; que después que se ganaron aquellos reinos de nuestros españoles, enseñados por los indios, se aprovecharon della.

"El nombre propio suyo entre los indios es *picietl*, que el tabaco es postizo, de nuestros españoles, por una isla do hay mucha cantidad dél, llamada este nombre (Tabaco).

"Hayla y nace en muchas partes de las Indias, ordinariamente en lugares húmidos y sombríos. Es menester que sea la tierra bien cultivada do se sembrare, y que sea tierra libre. Siémbrase en todo tiempo en las tierras calientes, y en todo tiempo nace; en las frías se ha de sembrar por el mes de marzo, porque se defienda de las heladas.

"Es hierba que crece y viene a mucha grandeza, muchas veces a ser mayor que un limón; echa un tallo desde la raíz que sube derecho, sin declinar a ninguna parte; echa muchos virgultos derechos que casi igualan con el tallo principal. Sus hojas son casi como de cidrón, salteadas; vienen a mucha grandeza, en especial las baxas, que son mayores que de romaza; son de color de un verde verdoso y de este color es toda.

"Es vellosa toda la planta y sus hojas. Puestas en las paredes, enjardinan como los cidrones y naranjos, porque todo el año está verde y tiene hojas; si algunas se secan, son las baxas.

"En lo alto de toda la planta echa la flor, la cual es a modo de campanilla blanca, y en medio encarnada, que tiene hasta gracia. Cuando se seca parecen dormideras negras. En ella está inclusa la simiente, que es en extremo menuda, de color leonado escuro."

El agujero de ozono de la Antártida

Desde hace diez años, por primavera, la capa de ozono se viene adelgazando en el polo Sur. ¿Se trata de una anomalía o anuncia acaso que esa capa absorbente del ultravioleta está en peligro?

Richard S. Stolarski

En 1985, los científicos expertos en atmósfera del Servicio Británico de Exploración Antártica publicaron un descubrimiento insospechado: entre 1977 y 1984 la cuantía de ozono atmosférico en primavera sobre Halley Bay, Antártida, había decrecido en más de un 40 por ciento. Otros grupos no tardaron en corroborar la información y mostrar que la región de merma de ozono superaba el perímetro del continente y se extendía entre unos 12 y 24 kilómetros de altura, abarcando gran parte de la baja estratosfera. Había, pues, un "agujero" de ozono en la atmósfera polar.

El descubrimiento preocupó tanto a los científicos como al público, porque sugería que la capa estratosférica de ozono que envuelve al globo podría estar en un peligro mayor que el predicho por los modelos atmosféricos. Una rápida erosión de la capa sería motivo de grave preocupación. El ozono, la molécula triatómica de oxígeno, no constituye siquiera una parte por millón de los gases de la atmósfera, pero reviste especial importancia porque absorbe la mayor parte de la radiación ultravioleta procedente del Sol, evitando que alcance la superficie de la Tierra. Tal radiación posee energía suficiente para romper moléculas de interés biológico, incluido el propio ADN. Aumenta la frecuencia de cáncer de piel, cataratas e inmunodeficiencias y podría estropear cosechas y alterar ecosistemas acuáticos.

Ante la gravedad de esos efectos, muchos investigadores, entre ellos el autor y sus colegas de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), se han apresurado a tratar de determinar las causas del agujero, que se forma cada primavera austral dentro del vórtice polar: masa de aire aislada que circula alrededor del polo Sur durante gran parte del año. (La cantidad de ozono que hay en el vórtice decrece a fines de agosto y principios de septiembre, se estabiliza en octubre y vuelve a aumentar en noviembre.) Mientras ignoremos por qué se forma el agujero, no podremos establecer si tiene implicaciones globales o quedará confinado a la estratosfera antártica, donde se dan unas condiciones meteorológicas únicas.

En la investigación se conjugan los equipos de medida instalados en tierra con otros transportados a bordo de globos y satélites. Los transportados en globo se ocupan, sobre todo, del examen de la composición química del aire que atraviesan. Los equipos instalados en el suelo o a bordo de satélites realizan la teledetección, verbigracia, la medición del espesor de la capa, o columna, que resultaría si todo el ozono que hay en la vertical de un observador en la superficie de la Tierra se sometiera a condiciones normales de presión y temperatura. Para obtener el espesor, que se consigna en unidades Dobson, o centésimas de milímetro, se mide la radiación que incide sobre la superficie terrestre a longitudes de onda ligeramente diferentes, parte de las cuales son fuertemente absorbidas por el ozono y parte de ellas no. (Los instrumentos a bordo de satélites registran la luz reflejada.) Si la cantidad de radiación emitida en las longitudes de onda absorbidas aumenta con respecto a la de las longitudes de onda no absorbidas, ha disminuido la cantidad de ozono; por el contrario, si la radiación emitida a las longitudes de onda absorbidas disminuye, el ozono ha aumentado.

Las investigaciones han contado con subvenciones y recursos internacionales. Citemos, a modo de muestra, que en 1987 se reunieron en Punta Arenas, Chile, unos 150 científicos y personal de apoyo que representaba a 19 organizaciones y cuatro naciones para llevar a cabo el estudio más ambicioso hasta entonces emprendido: el Experimento Aerotransportado del Ozono Antártico. Este proyecto, que resolvió que el agujero de ozono alcanzó su máximo en 1987, dispuso de equipos de medición instalados en tierra y a bordo de satélites y globos. Contó también con laboratorios aerotransportados. Un avión de pasajeros DC-8, especialmente acondicionado, y una versión más avanzada del U-2, el ER-2, volaron, varias veces, a través de la región mermada para recoger información detallada sobre su tamaño y composición química.

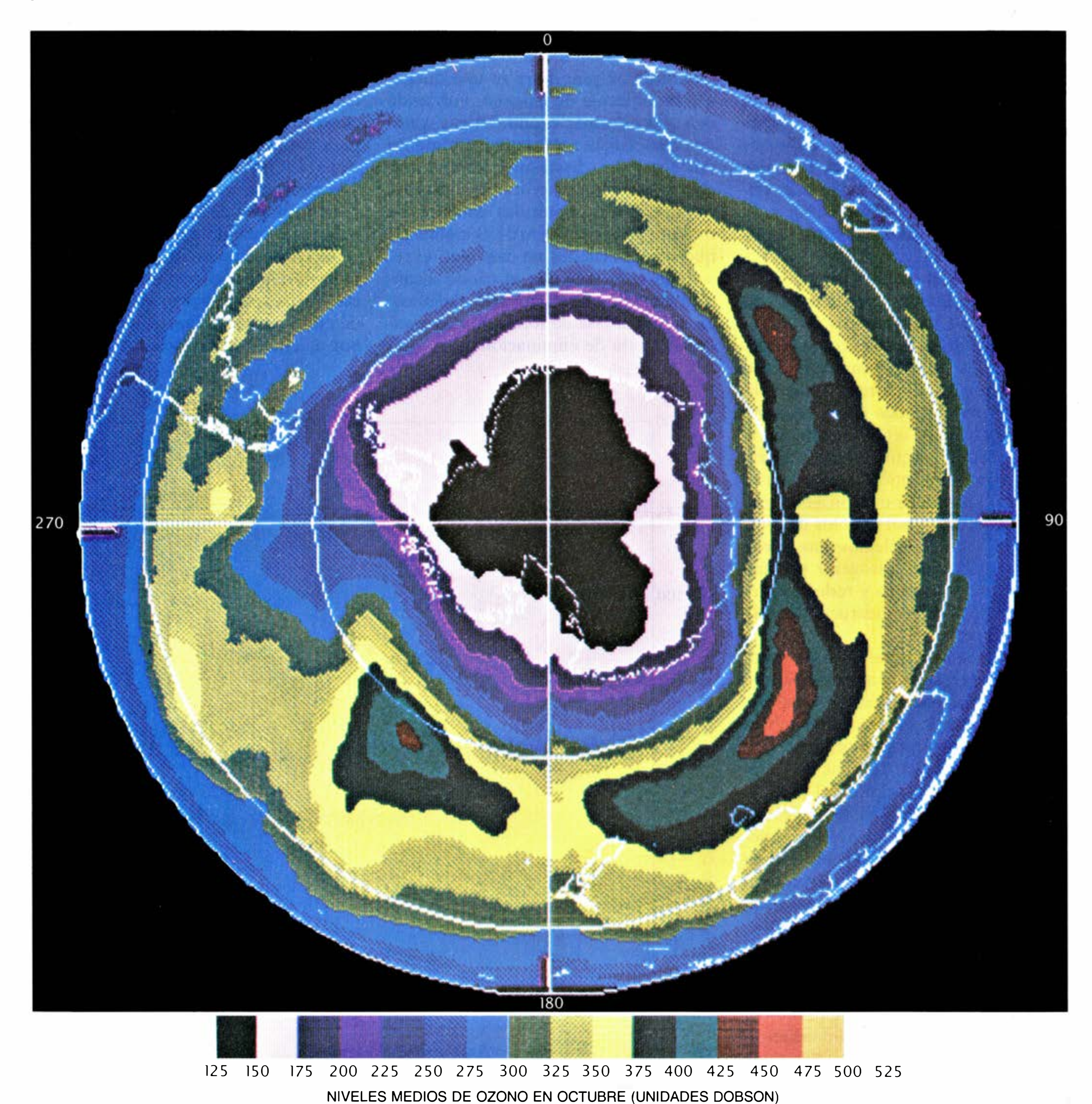
Igual que otros estudios recientes, la campaña de 1987 centró su atención en las dos explicaciones principales dadas sobre el agujero de ozono: la teoría que atribuye la causa determinante a los contaminantes y la que subraya el papel de un cambio natural en los movimientos atmosféricos que transportan aire rico en ozono hacia la estratosfera polar durante la primavera austral.

La preocupación por los contaminantes precedió a cualquier prueba del daño que podrían acarrear. En 1971, cuando se esperaba que los aviones de transporte supersónico se convirtieran en pobladores habituales de los cielos, muchos investigadores mostraron su inquietud ante los efectos perjudiciales que la emisión resultante de vapor de agua y óxidos de nitrógeno (NO_x) podría ejercer sobre la atmósfera a grandes alturas. Los estudios de laboratorio habían demostrado que ambos tipos de gases podían atacar al ozono. La supuesta flota supersónica nunca se construyó; pero los años siguientes trajeron otro motivo de alarma: los crecientes niveles de óxido nitroso (N_2O) en el ambiente provocados por el aumento de las combustiones y del uso de fertilizantes ricos en nitrógeno. Alarma que

subió de tono en 1974, cuando Mario J. Molina y F. Sherwood Rowland, de la Universidad de California en Irvine, alertaron sobre el empleo progresivo de los halocarburos. Desde entonces, el problema de los halocarburos ha centrado el interés de la investigación en este campo.

Los halocarburos, como el nombre sugiere, están constituidos por cloro, flúor y carbono. Introducidos hace unos 60 años, han servido como refrigerantes en neveras e instalaciones de aire acondicionado, propulsores para pulverizadores de aerosoles, agentes de producción de espumas y limpieza de componentes electrónicos, etcétera. Estos compuestos, de amplia aplicación, se consideraron, tiempo atrás, ideales entre los productos químicos industriales gracias a su estabilidad y no reactividad; tampoco resultaban, pues, tóxicos. Ironía de las cosas, el carácter inerte de estos compuestos es lo que los convierte en peligro potencial para el ozono de la estratosfera.

Los gases inertes no se degradan fácilmente en la troposfera (parte de la atmósfera que abarca desde la superficie de la Tierra hasta unos diez kilómetros de altura). Así, tales substancias acabarán por penetrar en la estratosfera, que se extiende hasta unos 50 kilómetros. Cuando las moléculas suben por encima de unos 25 kilómetros, donde la concentración de ozono viene a ser máxima, quedan sometidas a una intensa luz ultravioleta, absorbida por el ozono a altitudes menores. Esta ra-



1. MAPA DE LOS NIVELES DE OZONO en la atmósfera del hemisferio Sur correspondiente al día 5 de octubre de 1987. Pone de relieve el "agujero" primaveral de ozono (*negro*, *rosa* y *púrpura*) sobre la Antártida. En el agujero, la cuantía de ozono viene a ser la mitad de la que había diez años atrás, cifrada entonces en unas 300 unidades Dobson, como promedio. Cada unidad Dobson es una centésima de milímetro; mide el espesor de la capa que se obtendría si el ozono contenido en una capa atmosférica gozara de condiciones normales de presión y temperatura. El mapa se basa en datos recogidos por el Espectrómetro Cartográfico del Total de Ozono (TOMS) instalado a bordo del satélite *Nimbus 7* de la Administración Nacional estadounidense de Aeronáutica y del Espacio.

diación rompe moléculas normalmente estables (los halocarburos) transformándolas en otras formas más reactivas (átomos de cloro).

Los estudios de laboratorio demostraron que el cloro destruía fácilmente el ozono y llegaban a la atmósfera millones de toneladas de halocarburos; con esas dos premisas, muchos investigadores arguyeron que la liberación incesante conduciría, andando el tiempo, a la acumulación de los compuestos en la estratosfera hasta alcanzar un nivel capaz de debilitar el escudo protector de ozono. Parecía probable, además, que el proceso destructivo continuase hasta bien entrado el siglo venidero —aun cuando se suspendiera de inmediato la liberación de halocarburos— porque los productos químicos permanecen en la atmósfera decenios enteros. Las dos variedades más importantes, números 11 ($CFCl_3$) y 12 (CF_2Cl_2), duran unos 75 y 100 años, respectivamente.

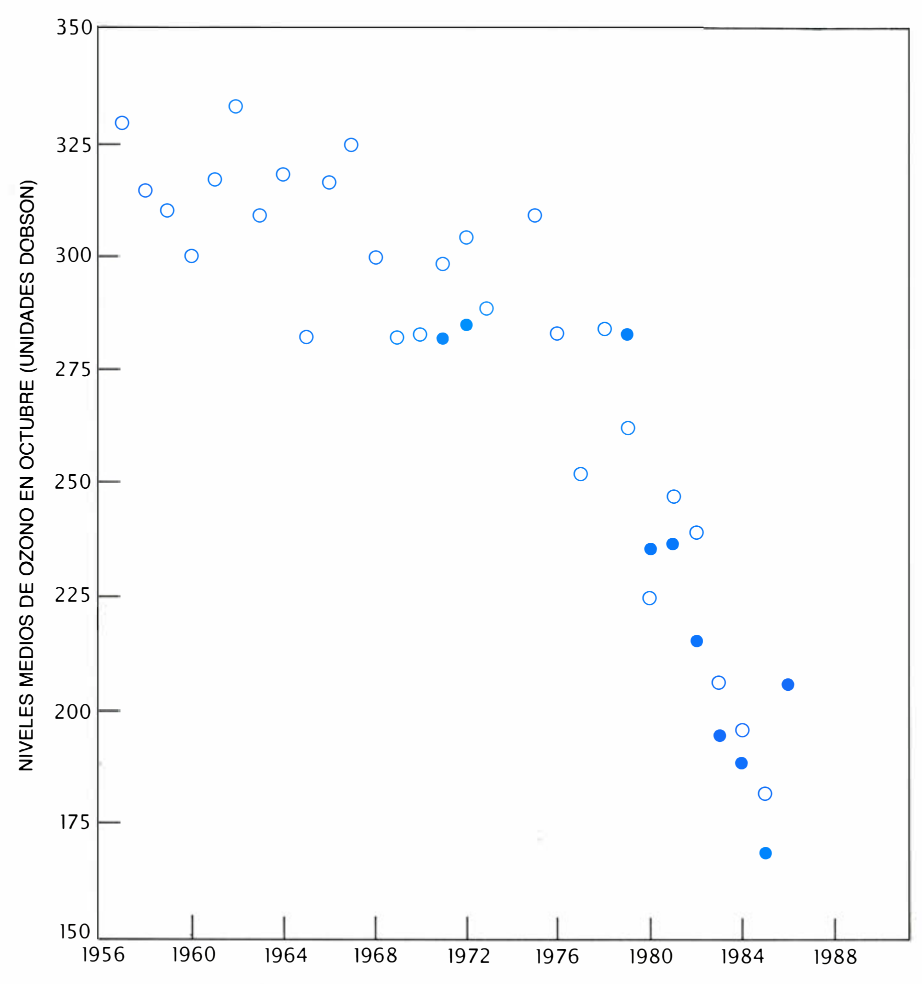
Dada la solidez de estos argumentos, los Estados Unidos prohibieron en 1978 el uso de halocarburos en pulverizadores de aerosol, tales como ciertos desodorantes y tónicos capilares. Pero los esfuerzos para controlar otras aplicaciones tuvieron poco éxito, en parte a causa del mejor conocimiento de la complejidad de la química de la estratosfera. En este sentido, aunque ya se sabía que los óxidos de nitrógeno y el hidrógeno podían por sí solos destruir el ozono, nuevos cálculos mostraron que los óxidos de nitrógeno podrían reaccionar con el cloro y reducir apreciablemente el poder destructor de éste sobre el ozono.

Así las cosas, llegó el informe británico a que aludíamos al principio del artículo: los niveles de ozono en la vertical de su base de investigación habían caído, durante el mes de octubre, desde un valor normal de unas 300 unidades Dobson a principios del decenio de 1970 hasta unas 184 unidades en 1984. La observación reavivó la inquietud general por la situación de la capa global de ozono. Contemporáneamente, los organismos responsables estaban ocupados en la conveniencia de establecer controles internacionales sobre los halocarburos, cuya tasa de desprendimiento seguía aumentando. De esas reuniones salió, en septiembre del año pasado, la firma de un acuerdo para reducir el consumo de tales substancias. El acuerdo, que aún deben ratificar al menos once naciones de las 23 comprometidas, antes de que entre en vigor a principios de 1989, requiere que las naciones desarrolladas congelen su consumo en el nivel de 1986 para mediados de 1990, y lo reduzcan a la mitad en 1999.

La teoría de los halocarburos se apoya en la capacidad que tiene el cloro de destruir ozono en grandes cantidades. Se crea una molécula de ozono (O_3) cuando la luz ultravioleta incide sobre una molécula de oxígeno (O_2). Un fotón rompe la molécula en dos átomos de oxígeno altamente reactivos (O). Estos se combinan rápidamente con moléculas de oxígeno normal para formar ozono (O_3). El gas absorbe fácilmente la luz ultravioleta y se disocia en sus partes componentes, O_2 y O; el átomo de oxígeno libre se une, luego, a otra molécula de oxígeno, volviendo con ello a formar ozono. El gas continúa disociándose y recombinándose así muchas veces, hasta que termina por chocar con un átomo libre de oxígeno, formando dos moléculas estables de oxígeno [*véase la figura 3*]. Suponiendo que las condiciones no cambien, el resultado neto será que el ozono alcanzará un régimen estacionario dinámico, en el que la tasa de formación equivaldrá a la tasa de eliminación.

El cloro altera este equilibrio y reduce la cantidad de ozono en la estratosfera mediante la aceleración de la conversión de éste en dos moléculas de oxígeno. Y lo que es más importante: el cloro, como los óxidos de nitrógeno y el hidrógeno, actúa catalíticamente, es decir, él queda incólume en el proceso. Consiguientemente, cada átomo de cloro puede destruir hasta 100.000 moléculas de ozono antes de perder su actividad o volver a la troposfera, donde la precipitación y otros procesos lo eliminan de la atmósfera.

El proceso químico que se cree impulsa tal destrucción es bastante sencillo. Cuando un átomo de cloro (Cl) choca con una molécula de ozono, el cloro roba el tercer átomo de oxígeno para formar un radical monóxido de cloro (ClO) y una molécula de oxígeno. Los radicales, moléculas que tienen un número impar de electrones, son muy reactivos. Cuando el monóxido de cloro se encuentra con un átomo libre de oxígeno —paso importante en el ciclo catalítico—, el oxígeno del monóxido de cloro se siente fuertemente atraído por el átomo libre y rompe el radical



2. DISMINUCION de los niveles de ozono sobre la Antártida en primavera (*izquierda*), observada por Joseph C. Farman y sus colaboradores del Servicio Británico de Exploración Antártica, quienes han vigilado el curso de los niveles de ozono en la vertical de Halley Bay desde 1956 (*circunferencias*). Después de que

para constituir una nueva molécula de oxígeno. El cloro "abandonado" queda libre, presto a comenzar de nuevo la destrucción del ozono.

El ciclo catalítico del cloro no suele operar sin trabas. Se cree que hay dos clases de reacciones importantes que se interponen en la destrucción del ozono, al menos en latitudes medias. En un caso, el monóxido de cloro reacciona con el óxido nítrico (NO). El átomo de oxígeno del monóxido de cloro pasa al óxido nítrico y se produce un átomo libre de cloro y dióxido de nitrógeno (NO_2). Cuando este último absorbe la luz visible, libera un átomo de oxígeno, que queda entonces disponible para regenerar ozono [*véase la figura 5*]. El resultado es que no varía la cantidad de ozono.

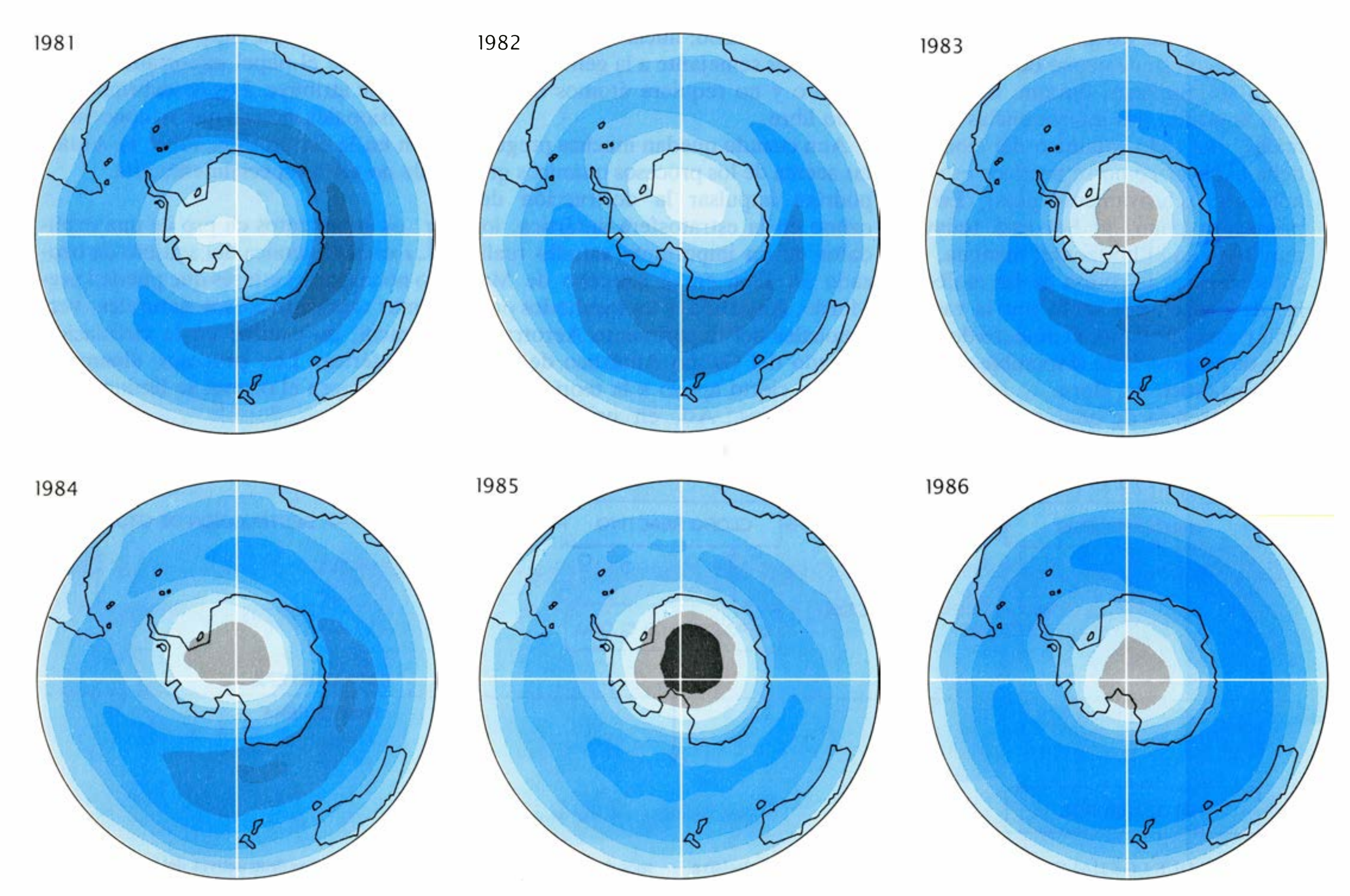
Veamos el segundo caso, más importante: un átomo de cloro o un radical monóxido de cloro se combina con otra molécula para formar un producto estable que actúa temporalmente como "depósito" de cloro; el cloro así combinado (lo está a lo largo de la mayor parte del tiempo en la atmósfera normal) se muestra incapaz para atacar el ozono. Dos depósitos importantes son el nitrato de cloro ($ClONO_2$), formado por la combinación del monóxido de cloro y el dióxido de nitrógeno (NO_2), y el ácido clorhídrico (HCl), producido por un átomo de cloro y metano (CH_4). Con el tiempo, tales depósitos absorben un fotón o reaccionan con otras especies químicas, se rompen y liberan el cloro, que reanuda su destrucción catalítica del ozono.

Ante la existencia de esas reacciones de interferencia, los usuarios de modelos de ordenador se han visto inducidos a concluir que los halocarburos han debido producir un efecto mínimo sobre la capa global de ozono. El descubrimiento de que los niveles de ozono en primavera en el polo Sur se han reducido en más del 40 por ciento sugiere que, si el cloro de los halocarburos es una de las causas, las reacciones normales de interferencia quedan minimizadas durante la primavera antártica. Pero, ¿cómo?

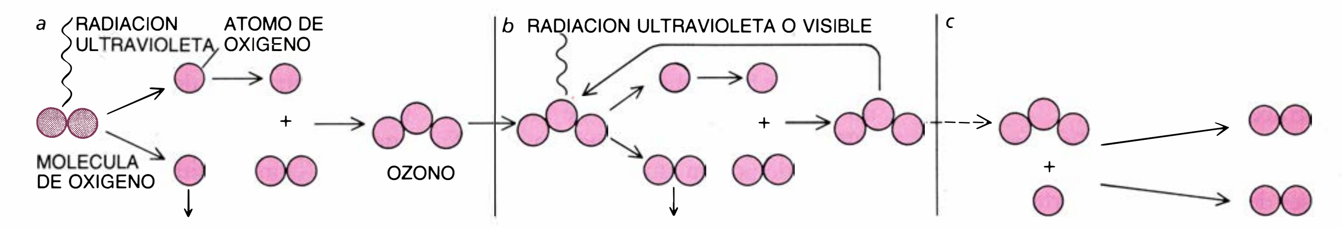
Los defensores de la teoría de los halocarburos han identificado varios procesos que podrían muy bien minimizar los efectos de dichas interferencias. Por ejemplo, la eliminación, de la estratosfera, de los óxidos de nitrógeno facilitaría la destrucción del ozono. Si no hubiera óxidos, no podrían combinarse con el cloro y formar el depósito de nitrato de cloro. Asimismo, otros procesos podrían alterar los depósitos de cloro obligándolos a liberar cloro activo en la forma de átomos sueltos o de monóxido de cloro, que destruiría el ozono.

Muchos investigadores sospechan que las nubes estratosféricas polares contribuyen a tales procesos. Estas nubes de gran altura, más habituales en la Antártida que en el Artico, se forman en invierno, cuando la ausencia de luz solar y el aislamiento de la región antártica provocan, con frecuencia, temperaturas estratosféricas por debajo de los -80 grados Celsius.

Resulta verosímil, pues, que los compuestos de nitrógeno se condensen y congelen en invierno, quedando incorporados en las partículas de la nube y, por ende, inhabilitados para reaccionar con el cloro. Al mismo tiempo, las partículas de la nube podrían facilitar la



publicaran su descubrimiento en 1985, la NASA lo confirmó mediante satélites (*círculos llenos*). Otros datos de la NASA (*derecha*) mostraron que la región mermada de ozono superaba el continente antártico y estaba flanqueada por una región rica en ozono (*figura en forma de cuarto creciente*). Los mapas, recreados para mayor claridad, se basan en datos del TOMS. El negro indica desde 150 a 180 unidades Dobson; le siguen el gris y los azules cada vez más oscuros.



3. EL OZONO de la atmósfera absorbe grandes cantidades de radiación ultravioleta que, de no hacerlo, llegarían a la superficie terrestre. El gas se crea (*a*) cuando un fotón ultravioleta, de gran energía, incide sobre una molécula de oxígeno (O_2), dejando a sus átomos (O) libres para combinarse con moléculas de oxígeno próximas. El ozono (O_3) así formado se desintegra repetidamente por fotones de luz visible o ultravioleta y se regenera rápidamente, listo para absorber más radiación (*b*). El ozono "muere" (*c*) cuando un átomo de oxígeno choca con él y forma dos moléculas de oxígeno. (Esquema de George V. Kelvin.)

conversión de depósitos de cloro en cloro activo. Ciertas reacciones químicas que se producen con parsimonia en un medio gaseoso pueden desarrollarse mucho más deprisa sobre las superficies de las partículas. En la oscuridad del invierno polar, muchos procesos químicos se hallan virtualmente suspendidos. Sin embargo, es posible que las partículas de las nubes polares estratosféricas aprisionen y modifiquen lentamente los principales depósitos de cloro, preparando al monóxido de cloro para un rápido "escape" en cuanto el sol vuelva a lucir. Por desgracia desconocemos la composición de las partículas de las nubes y las reacciones exactas que tienen lugar en su superficie.

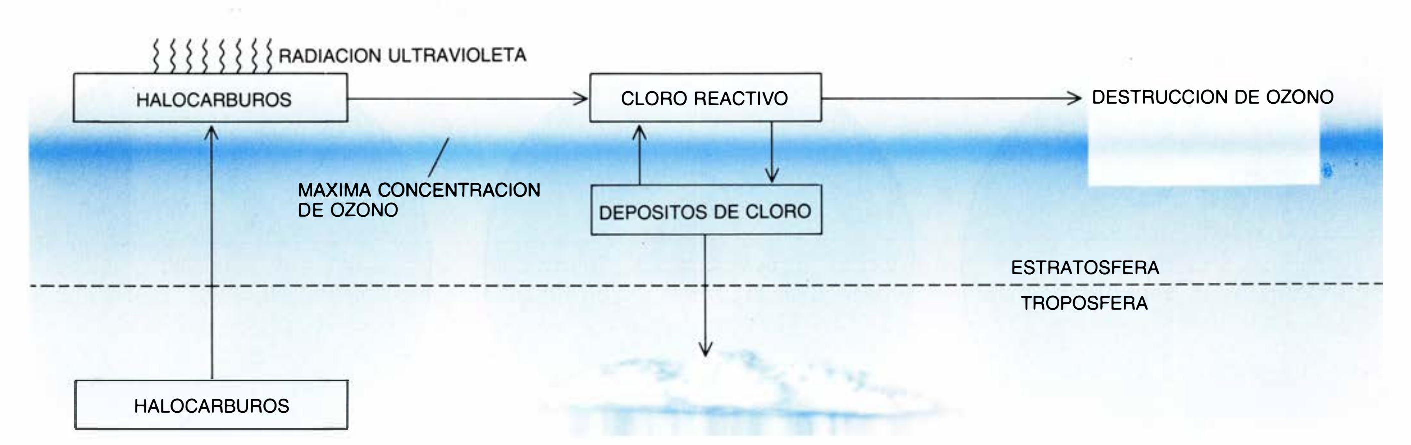
La teoría de los halocarburos aplicada al agujero de ozono debe explicar cómo se inutilizan, durante la primavera antártida, las interferencias "normales" del ciclo catalítico del cloro; y debe explicar cómo se produce ese fenómeno exclusivamente polar. En la primavera polar, el Sol está todavía muy bajo en el horizonte; mengua, en consecuencia, la rotura de las moléculas de ozono provocada por la radiación y cae, por tanto, el número de átomos de oxígeno libre disponible para el ciclo catalítico del cloro.

La presencia de una cantidad razonable de bromo (Br) en la estratosfera polar podría ayudar a compensar esa merma de átomos de oxígeno libres. Lanzado a la atmósfera a través de bromuro de metilo, un compuesto natural, de fumigantes y de ciertos extintores de incendios, puede combinarse con el ozono para formar el radical monóxido de bromo (BrO) y una molécula de oxígeno. El monóxido de bromo, a su vez, puede reaccionar con el monóxido de cloro, formar otra molécula de oxígeno y soltar los átomos libres de cloro y bromo. (El resultado neto es la transformación de ozono en oxígeno.) Ese ciclo catalítico cloro-bromo puede actuar eficazmente aun cuando escaseen en el medio los átomos de oxígeno libre. El bromo, por sí solo, destruye también el ozono: inicia una cadena de reacciones semejante a la generada por el cloro y no requiere átomos de oxígeno libre.

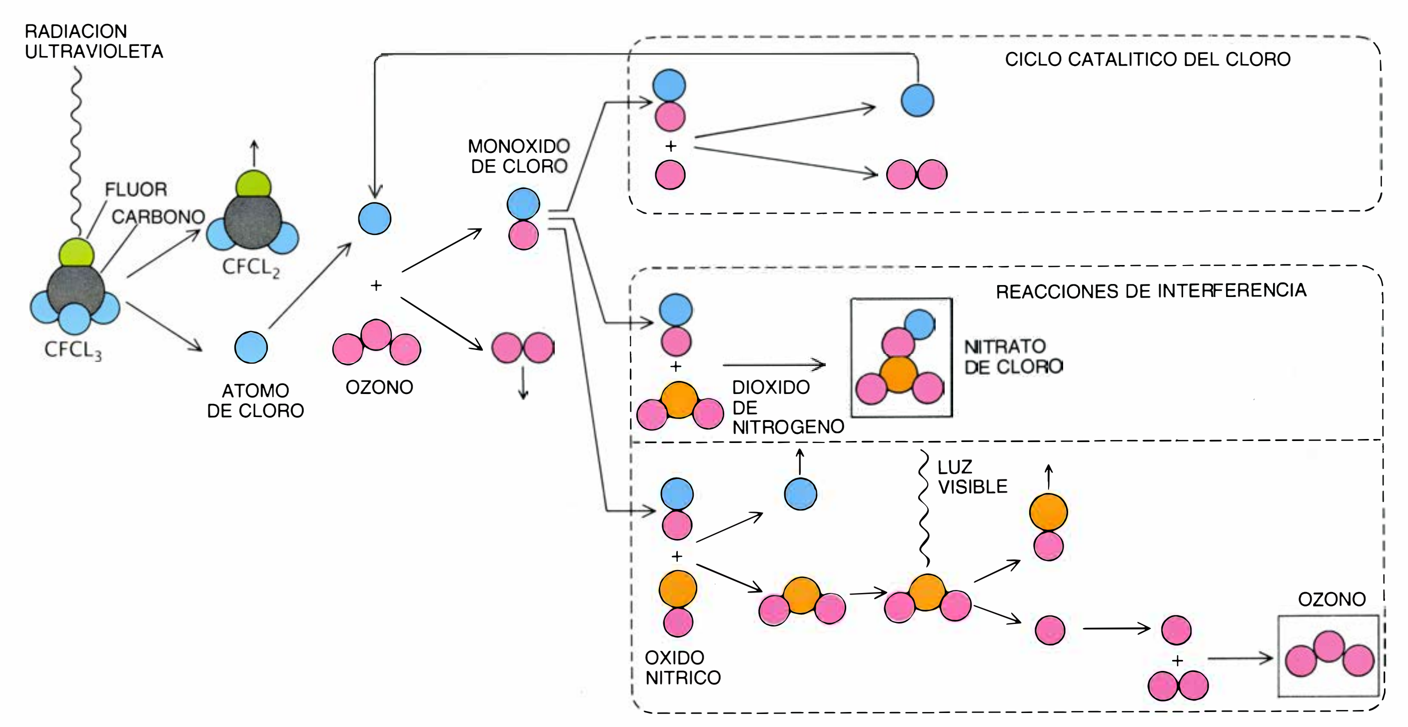
Aun cuando quedan muchas preguntas acerca de los procesos químicos que podrían impulsar la destrucción del ozono en la estratosfera antártica, los datos de un importante estudio realizado en 1986 en el estrecho de McMurdo, Antártida, y los resultados provisionales del Experimento Aerotransportado del Ozono Antártico de 1987 prestan cierto apoyo a la teoría de los halocarburos. Así, en primavera las cantidades de monóxido de cloro en el agujero de ozono son elevadas comparadas con las de latitudes medias. Además, como estaba previsto, los niveles de óxido de nitrógeno en el agujero están muy bajos en comparación con los de latitudes medias.

Los datos proporcionan también pruebas que corroboran la hipótesis de la alteración, por parte de las nubes, de los depósitos de nitrato de cloro y ácido clorhídrico. Los niveles de ambos depósitos en estado gaseoso, bajos al comienzo de la primavera antártica (cuando el agujero se está formando), suben después. El aumento abona la idea de un almacenamiento inicial de gran parte del gas en una forma no detectable: las partículas de nubes, por ejemplo. No está claro que el bromo desempeñe el papel importante que la teoría le atribuye. Los descubrimientos provisionales indican que su concentración en la estratosfera sobre la Antártida no sería especialmente alta.

Los argumentos en pro de una explicación química del agujero de ozono no niegan el interés que puedan presentar ciertos procesos naturales, verbigracia, un cambio en la circulación atmosférica. Los procesos dinámicos no destruyen el ozono; se limitan a redistribuirlo.



4. SE CREE QUE LOS HALOCARBUROS contribuyen de manera decisiva al agujero de ozono. Una vez liberados en la troposfera, donde permanecen inertes, los compuestos llegan hasta la alta estratosfera, por encima de la región donde la concentración de ozono es máxima (*en color*). La radiación ultravioleta adquiere allí suficiente intensidad para romper las moléculas y liberar los átomos de cloro que atacan al ozono. Los efectos destructivos del cloro terminan cuando los átomos se combinan con otras substancias para formar "depósitos" estables de cloro. Tales moléculas podrían disociarse en presencia de luz o calor, devolviendo el cloro a la estratosfera; algunas de ellas se quedarían en la troposfera, donde procesos de distinta índole terminarían por arrojarlas de allí.



5. QUIMICA DEL CLORO. Abarca procesos que favorecen la destrucción del ozono y otros que la entorpecen. Un átomo de cloro puede destruir catalíticamente el ozono (*parte superior izquierda*) sin consumirse él. Comienza por "robarle" al ozono un átomo de oxígeno para formar monóxido de cloro (ClO) y una molécula estable de oxígeno. Cuando el ClO choca con otro átomo de oxígeno, los dos oxígenos se combinan fácilmente y dejan libre el átomo de cloro para que elimine otra molécula de ozono. Otros procesos entorpecen, en cambio, el ciclo catalítico. Por ejemplo, el dióxido de nitrógeno (NO_2) puede unirse al monóxido de cloro para formar un depósito de cloro (*parte central*); el cloro así combinado no puede reaccionar con el ozono. Otra sustancia bloqueadora (*abajo*) es el óxido nítrico (NO); toma del monóxido de cloro el átomo de oxígeno, absorbe luz visible y regenera el ozono. Las explicaciones químicas del agujero de ozono sugieren que las condiciones climáticas, únicas, del polo Sur no favorecen esos obstáculos contra el ciclo catalítico, que se realizaría eficazmente.

La sospecha de la implicación de un cambio dinámico se basa en el hecho de que la atmósfera no es estática. Antes bien, se trata de un fluido tridimensional en constante movimiento, que modifica la posición y concentraciones, no sólo del ozono, sino también de todas las especies químicas que le afectan. Si los niveles de ozono, que siempre fluctúan hasta cierto punto, vinieran condicionados sólo por el Sol, cabría esperar que los niveles más altos se dieran allí donde la insolación es más intensa: alturas muy grandes y latitudes muy bajas. La verdad es que los niveles de ozono se hacen máximos en la parte media de la estratosfera, y no en su cima. Además, las mayores cantidades no se encuentran sobre el Ecuador, donde los niveles de ozono son típicamente de sólo unas 260 unidades Dobson, sino cerca de los polos.

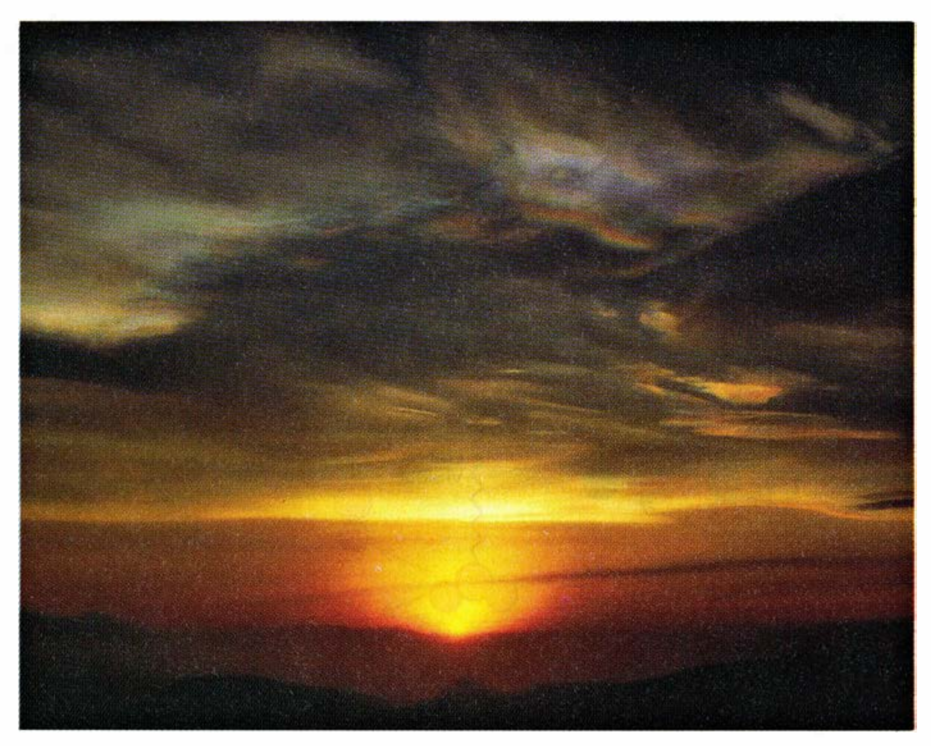
La razón de esa distribución estriba en la tendencia del aire estratosférico a circular desde grandes alturas en los trópicos hacia alturas menores en las regiones polares, transportando con él ozono recién sintetizado. En el hemisferio Norte, el aire estratosférico circula hasta el polo Norte, mientras el nivel medio de ozono alcanza unas 450 unidades Dobson a fines de invierno o comienzos de primavera. En el hemisferio Sur, la circulación sólo llega, por lo general, hasta unos 60 grados de latitud Sur durante la mayor parte del año; los niveles máximos de ozono alcanzan allí unas 380 unidades Dobson. Las peculiaridades de la meteorología antártica, recuérdese el vórtice polar, dificultan que el aire rico en ozono avance hacia el Sur hasta finales de primavera.

Debido, en parte, a ese comportamiento de la circulación, la cantidad de ozono en la atmósfera antártica se mantenía anteriormente casi constante a unas 300 unidades Dobson, durante el invierno y primavera. Esa cuantía aumentaba luego muy deprisa hasta casi 400 unidades Dobson, a finales de primavera, cuando el vórtice polar se deshacía para posibilitar una rápida entrada de aire de latitudes más bajas. Ahora, la cantidad de ozono se mantiene casi constante durante el invierno, pero cae bruscamente en primavera por debajo de las 200 unidades Dobson.

Una primera explicación dinámica de la disminución primaveral indicaba que los aerosoles, o finas partículas, procedentes de la erupción en 1982 del volcán El Chichón, de México, podrían haber absorbido la radiación solar, calentando la estratosfera y produciendo un movimiento semejante al de un surtidor que elevaría el aire rico en ozono y lo arrastraría fuera de la región. Pero ahora han desaparecido ya la mayoría de los residuos de la erupción, lo que significa que los niveles de ozono deberían haber empezado a recuperarse. De acuerdo con otra teoría, el afloramiento se produce porque la circulación de aire rico en ozono, desde latitudes más cálidas hacia el polo Sur, se ha debilitado; a su vez, se ha desarrollado una circulación inversa, que arrastra el aire polar rico en ozono, desde la baja estratosfera hacia arriba, y lo transporta hacia el Ecuador. Este aire se sustituiría con aire pobre en ozono de la troposfera inferior.

Las pruebas a favor de un mecanismo dinámico podrían provenir del análisis de las temperaturas. Si la circulación de primavera no ha logrado llegar a la región polar, debería darse una caída en la temperatura y en la cuantía de ozono. Pero no se han descubierto cambios significativos en la temperatura de la estratosfera antártica, durante los meses de agosto y septiembre, cuando se está formando el agujero; sí se han hallado temperaturas medias más bajas en octubre. Este último descubrimiento podría reflejar un retraso en la entrada primaveral de aire cálido en la región.

Como frecuentemente ocurre en la ciencia, la disminución de la temperatura en octubre admite otras interpretaciones. Podría deberse, por ejemplo, a la caída de ozono estratosférico provocada por procesos químicos y no por cambios en las configuraciones de la



6. NUBES ESTRATOSFERICAS POLARES sobre la Antártida. Se forman cuando las bajísimas temperaturas de invierno hacen que el vapor de agua y posiblemente otros gases, como el ácido nítrico, se condensen y congelen. Se ha propuesto que las nubes facilitarían la destrucción de los depósitos de cloro, dejando a éste libre para destruir el ozono cuando la luz solar retorna en primavera. (Fotografía de Mark Muller.)

circulación atmosférica. Puesto que el ozono absorbe la luz solar, la destrucción del gas en primavera podría determinar una menor absorción de radiación solar que lo habitual y, en consecuencia, una estratosfera más fría.

Hay pruebas más claras de la contribución de procesos dinámicos en la formación del agujero de ozono. El Experimento Aerotransportado del Ozono Antártico de 1987 informó que el día 5 de septiembre los niveles de ozono cayeron en torno a un 10 por ciento, dentro de una superficie de unos tres millones de kilómetros cuadrados. En opinión de los investigadores, ningún proceso químico verosímil podría justificar un descenso tan rápido y espectacular; sí, en cambio, lo hacía el movimiento atmosférico. En este caso, parece probable que el aire pobre en ozono penetrara temporalmente en la región, tal vez desde la baja estratosfera. Por otra parte, cuando se midieron las concentraciones de gases que sirven de trazadores para el movimiento atmosférico, no se hallaron pruebas de un afloramiento persistente y en gran escala en la estratosfera.

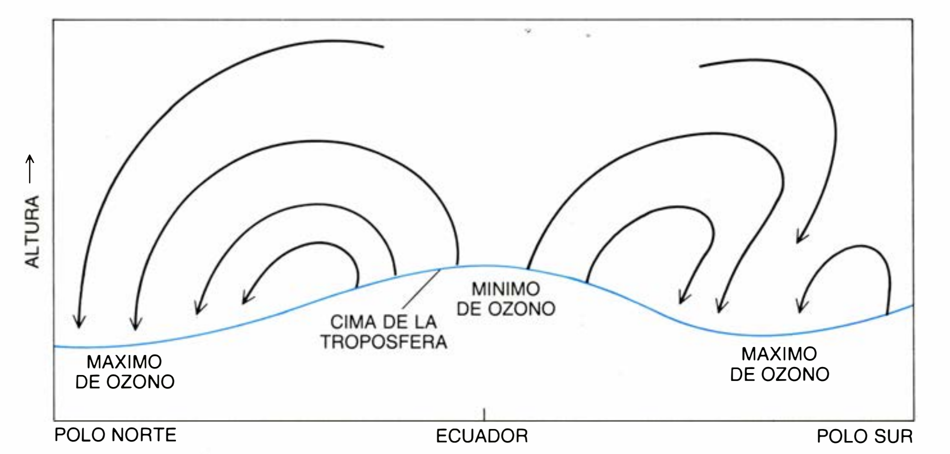
Se está pensando en ambas teorías, la dinámica y la química, en busca de explicación de otro rompecabezas científico relacionado con el que nos ocupa: la cuantía de ozono estratosférico ha disminuido en toda la región al sur de 45 grados de latitud del hemisferio meridional. Un debilitamiento de la circulación procedente de latitudes medias podría contribuir a tal disminución, pero la química podría igualmente desempeñar un papel importante: el aire químicamente mermado en ozono procedente del vórtice polar podría mezclarse con el aire de la región circundante y producir así una pérdida neta de ozono.

Tomados en conjunto, los últimos datos recogidos añaden nuevo peso a la creciente sospecha de la responsabilidad de los halocarburos en el agujero de ozono. Los descubrimientos corroboran, asimismo, que el fenómeno viene condicionado también por las características meteorológicas, únicas, de la región (vórtice polar, temperaturas estratosféricas muy bajas y nubes estratosféricas polares), sin desechar la posibilidad de un cambio en la circulación en el hemisferio Sur. ¿Qué tiene eso que ver con el peligro que se cierne sobre el escudo mundial de ozono?

Los datos sugieren que la pérdida de ozono en el polo Sur, singularmente estacional, podría constituir una peculiaridad regional que no se repita en climas más cálidos. Pero nada lo asegura. Hay una cosa clara: los halocarburos pueden alterar los niveles de ozono atmosférico. Además, el cloro introducido ya en la estratosfera reaccionará con el ozono durante decenios.

Por esas razones hemos de alabar el reciente acuerdo sobre control del consumo mundial de halocarburos. Habrá que establecer, por supuesto, si los objetivos del tratado son suficientes o si pecan de una severidad innecesaria; pero ese punto se aclarará pronto. Los resultados finales del Experimento Aerotransportado del Ozono Antártico estarán disponibles hacia mediados de 1988, a tiempo para su inspección científica en 1989 y para un reexamen del acuerdo de Montreal ya programado para 1990.

El agujero de ozono ofrece, mientras tanto, un aspecto positivo. Además de convencer a la comunidad internacional para que salga al paso de una amenaza contra el medio ambiente, ha espoleado a los investigadores a estudiar, con mayor profundidad, la química y dinámica de la atmósfera. Gracias a ese esfuerzo, conocemos muchísimo mejor la interacción entre el ozono y otros gases, así como la función que en esa interacción desempeñan las condiciones meteorológicas.



7. CIRCULACION ESTRATOSFERICA. Desde el Ecuador desciende hacia los polos y transporta ozono con ella. Por ese motivo, los niveles globales de ozono no muestran su máximo en el Ecuador, donde se produce la mayor parte del mismo, sino en la proximidad del polo Norte y a unos 60 grados de latitud Sur. (El ozono no llega más al Sur durante la mayor parte del año porque a esa latitud la circulación encuentra resistencia.) Los niveles de ozono vienen condicionados, pues, por la circulación; ese hecho plantea la posibilidad de que el agujero dependa, en buena parte, de una variación en la circulación en el hemisferio meridional.

Células asesinas

Integrantes del sistema inmunológico, son capaces de reconocer un objetivo, rodearlo y acoplarse a él. Tras esa unión, segregan una proteína letal que perfora la superficie de la víctima y la mata

John Ding-E Young y Zanvil A. Cohn

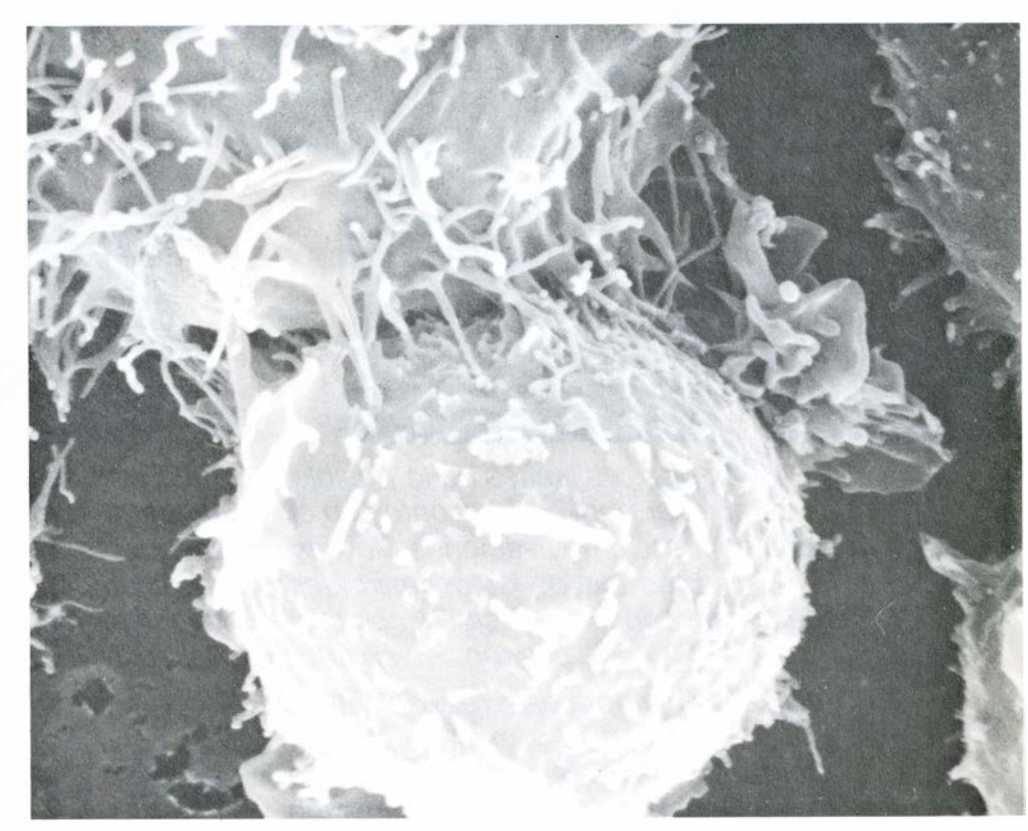
A menudo se compara el sistema inmunológico con un ejército y, a sus células, con soldados. Quizás en ningún caso resulte tan adecuada la analogía como en el de las denominadas células asesinas, o exterminadoras. Su principal misión consiste en localizar y destruir las células del organismo que han perdido el control; por ejemplo, las tumorales o las que han sido infectadas por virus o por algún otro agente foráneo. De antaño se conoce la eficacia con que las células exterminadoras desempeñan su tarea: localizan su objetivo, la célula descontrolada, se pegan a ella y la matan. Todo ello sin lesionar las células sanas del entorno. Quedaban por resolver, sin embargo, cuestiones fundamentales. ¿Cómo actúan? ¿Cuál es exactamente el procedimiento que siguen las células asesinas para matar?

Para algunas de las preguntas empieza ya a tenerse respuesta. Reunida la célula exterminadora con su víctima, aquélla agujerea a cañonazos la superficie de ésta. En concreto, dispara moléculas de una proteína letal, que taladran la membrana superficial de la víctima; por esas perforaciones, la célula pierde líquido y, al poco, muere.

Los trabajos realizados en varios laboratorios, incluido el nuestro de la Universidad Rockefeller, han demostrado que esa proteína perforadora forma parte del arsenal armamentístico de los dos tipos de células exterminadoras, las *T* citotóxicas y las denominadas células asesinas naturales. Nuestro grupo ha encontrado una proteína con función similar en el eosinófilo, otra célula del sistema inmunológico. Parece, incluso, que, en una grave disentería causada por una ameba, el microorganismo se sirve de la misma proteína, u otra muy similar, para agredir a las células humanas.

En nuestra opinión, las proteínas perforadoras podrían desempeñar un papel de primer orden en una amplia gama de respuestas celulares con resultado de muerte del objetivo. El conocimiento profundo de esos mecanismos beneficiaría de modo especial a la medicina. Por ejemplo, neutralizando la proteína perforadora podrían tratarse la disentería amebiana y otras enfermedades parasitarias, fúngicas y bacterianas. Más importante, incluso, resultaría descubrir el modo de incrementar el proceso de taladrado por parte de las células del sistema inmunológico: ello colaboraría en el tratamiento del cáncer y de enfermedades víricas hoy incurables, como el SIDA.

Las células exterminadoras son elementos del sistema inmunológico celular, pero su funcionamiento, letal y de gran precisión, sólo puede estudiarse y comprenderse en el contexto del sistema imunológico global. Al componente celular debe sumarse otro humoral, un sistema protector del organismo frente a bacterias y moléculas tóxicas, en particular. Sus armas son los anticuerpos, o inmunoglobulinas, que sintetizan y excretan los linfocitos *B*. Cada ejemplar de los millones de células *B* que posee el organismo sintetiza un solo tipo de anticuerpo, capaz de reconocer un antígeno específico (una diseño molecular específico); en la célula, los anticuerpos se sitúan sobre la superficie. Cuando el linfocito topa con una bacteria o una toxina que exhiban ese antígeno, prolifera. Parte de su descendencia formará células de "memoria", que se ocuparán de facili-



1. CELULA ASESINA destruyendo una célula tumoral, según se observa en esta secuencia de electromicrografías de barrido. En la imagen de la izquierda, una célula *T* citotóxica (*arriba*) establece contacto con una célula diana, menor. En la del centro ya se advierte la presencia de lesiones: la célula diana, cuya mem-

tar una respuesta más rápida ante una ulterior aparición del mismo antígeno; pero la mayor parte se transformará en células plásmáticas, que sintetizan y excretan grandes cantidades del anticuerpo, que se unen al antígeno. La propia unión precipita, o neutraliza de algún otro modo, las toxinas. Cuando el invasor es una célula, la adhesión del anticuerpo desencadena una cascada de reacciones en la superficie celular. Protagonizan dichas reacciones un grupo de proteínas de la sangre denominadas colectivamente el complemento. El resultado final de esas reacciones es la muerte de la célula.

Los precursores de los linfocitos *B* lo son a su vez de una amplia familia de linfocitos *T*, que constituyen la base del sistema inmunológico celular. Algunas de éstas, las coadyuvantes (*helper*) y las supresoras, modulan ambos sistemas, el humoral y el celular, sobre todo por la secreción de linfocinas, que son mensajeros químicos. La célula efectora más importante del sistema celular es el linfocito *T* citotóxico, o célula *T* asesina, ya mencionada. Sus principales objetivos son las células infectadas por virus. La célula asesina natural, el otro tipo de exterminadora, es también un linfocito. Se desconoce su ascendencia, pero parece guardar un estrecho parentesco con la célula *T* citotóxica. Se cree que sus objetivos principales son las células tumorales y quizá también células infectadas por agentes no víricos.

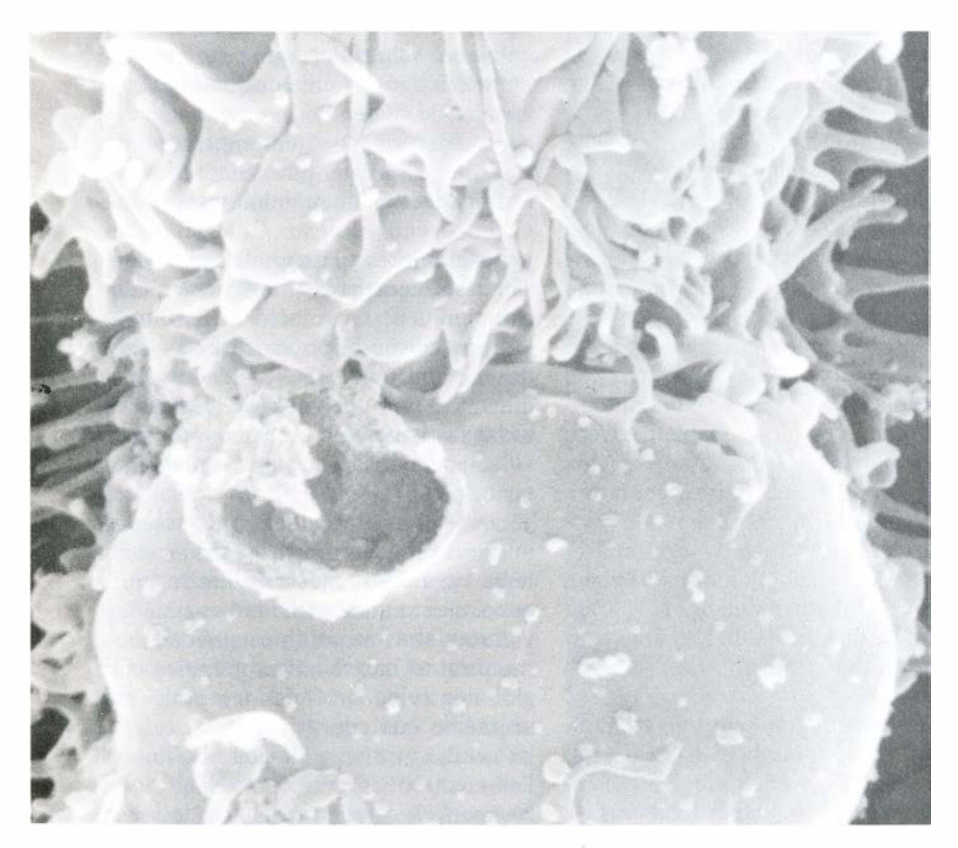
Como en el caso de los linfocitos *B*, la función de los *T* depende, en primera instancia, del correcto reconocimiento de un objetivo adecuado. Las células *T* exhiben en su superficie receptores específicos comparables a los anticuerpos de las células *B*, que reconocen y se unen a determinados antígenos superficiales. Pero las *T* son más selectivas que las *B*. Sólo reconocen al antígeno si se lo "presenta" alguna de las moléculas que constituyen el denominado complejo mayor de histocompatibilidad (MHC). Las células exterminadoras naturales son, como sugiere su nombre, menos selectivas con sus víctimas. Sus receptores realizan una discriminación más burda y no les limita el MHC.

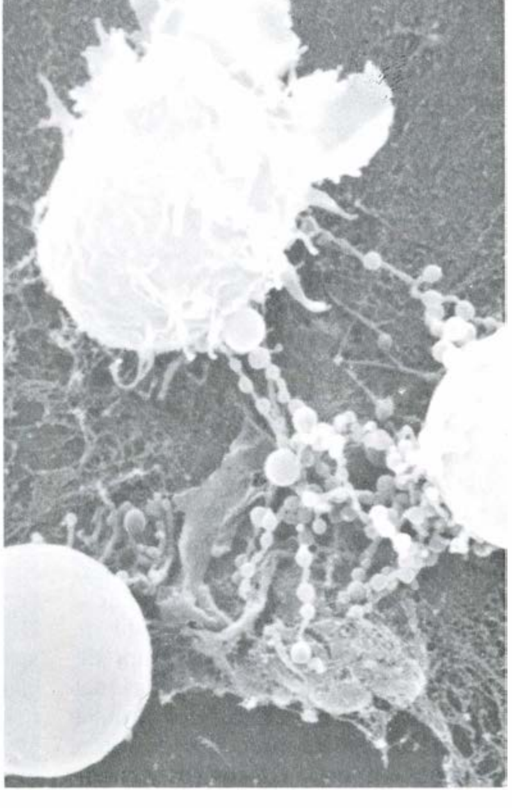
Una vez identificado el objetivo, la célula exterminadora, natural o *T*, se le une estrechamente. El contacto íntimo desencadena el proceso letal y, a la vez, asegura que la destrucción no afecte de modo indiscriminado a las células vecinas.

Hasta aquí llegaba lo que del proceso se conocía hace una década; seguía ignorándose la naturaleza del proceso letal. Los primeros indicios se obtuvieron a comienzos de la década de 1970, fruto de las investigaciones realizadas en varios laboratorios, en particular en los de Eric Martz, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, Christopher S. Henney, de la Immunex Corporation, de Seattle, William R. Clark, de la Universidad de California en Los Angeles, Pierre Golstein, del Centro de Inmunología de Marsella, y Gideon Berke, del Instituto Weizmann de Ciencias, de Israel. Sus trabajos disecaron el proceso de exterminio en una secuencia de estadios diferenciados.

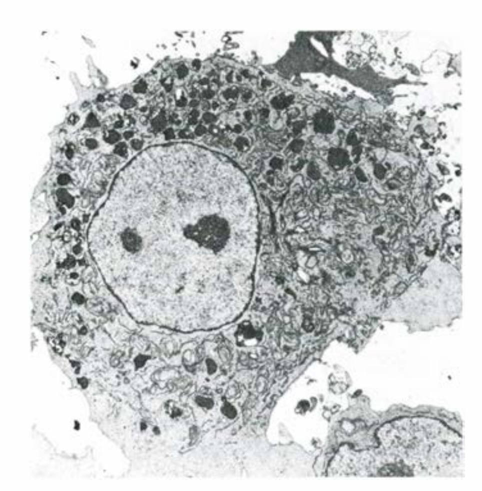
En primer lugar se advirtió que, cuando el linfocito y su objetivo entraban en contacto estrecho, se formaba un "conjugado". A continuación se producía algún tipo de descarga dañina, que lesionaba la víctima. La descarga desencadenaba lo que parecía constituir una muerte programada de la célula herida: la muerte procedía siguiendo un curso predeterminado (salvo en ausencia de iones de calcio), incluso cuando se escindía el conjugado y el linfocito partía a iniciar otro ciclo destructor.

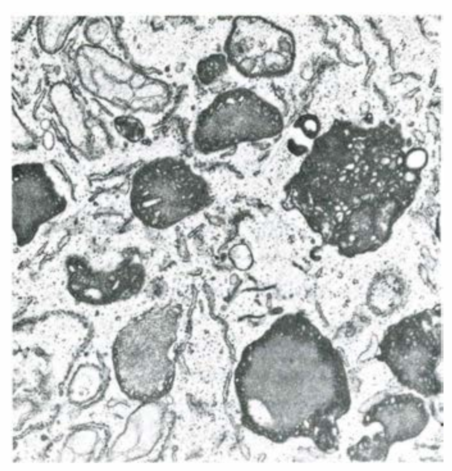
Henney y Martz fueron de los primeros en sugerir que, aparentemente, los linfocitos mataban lesionando la membrana plasmática (exterior) de sus dianas. La hipótesis se basaba en su observación de que las moléculas radiactivas introducidas de antemano en las células diana salían rápidamente al exterior cuando los linfocitos dañaban los





brana externa está tachonada de agujeros abiertos por una proteína segregada por la célula asesina, se hincha como un globo por la entrada de agua desde el exterior. En la micrografía derecha, de la célula tumoral no queda más que el núcleo y algunos restos (el otro núcleo que aparece en la imagen pertenece a otra célula). Chau-Ching Liu preparó las células y, Gilla Kaplan, las micrografías. En las dos primeras, el aumento es de 5700 diámetros; en la tercera es de 4200.





2. CELULA *T* CITOTOXICA CULTIVADA aumentada 1400 diámetros en una micrografía (*izquierda*) realizada por los autores en colaboración con Hans Hengartner y Eckhard R. Podack. Los gránulos de almacenamiento, oscuros y aumentados 7600 diámetros en la imagen de la derecha, poseen una membrana densa a los electrones. Su matriz, amorfa, contiene perforina, la proteína que protagoniza el ataque letal.

objetivos. La permeabilidad de la membrana se limitaba a moléculas de cierto tamaño a máximo, señal de que el daño resultante del ataque a la membrana podía ser la apertura de agujeros, o poros.

La sospecha cobró visos de verosimilitud en 1980. Robert R. Dourmashkin y Pierre Henkart, del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer, y sus colegas, examinaron micrografías de la superficie de células diana lesionadas, aumentada miles de veces; detectaron estructuras anulares que semejaban agujeros. Tres años más tarde, Eckhard R. Podack, de la Facultad de Medicina de Nueva York, y Gunther Dennert, de la Facultad de Medicina de la Universidad del Sur de California, estudiaron los efectos causados por las células exterminadoras al ponerlas en contacto con células tumorales. Comprobaron que la superficie de la célula diana aparecía tachonada de agujeros, cuyo diámetro interno oscilaba entre los cinco y los 20 nanómetros (millonésimas de milímetro).

Sin embargo, no estaba en absoluto claro si los poros los abrían los linfocitos o si sólo reflejaban un estadio terminal de la muerte de la célula, causada por alguna otra lesión. La búsqueda de la respuesta estuvo obstaculizada durante tiempo por la falta de una buena fuente de células asesinas. En 1977, Steven Gillis, de Immunex, Kendall A. Smith, de la Facultad de Medicina de Dartmouth, y el grupo de Robert C. Gallo, del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer, lograron el cultivo *in vitro* de linfocitos de ratón (de ambos tipos, *T* citotóxicos y exterminadores naturales). Lo consiguieron tras identificar los nutrientes y factores de crecimiento necesarios para la supervivencia de esas células en cultivo. Uno de los factores clave resultó ser la interleucina-2, una linfocina. El cultivo permitió la obtención de clones descendientes de progenitores conocidos; se disponía, por consiguiente, de una fuente rica y homogénea de células *T* citotóxicas y de exterminadoras naturales de características conocidas. Quedaba expedito el camino para abordar el estudio detallado de esas células con las herramientas de la biología celular y la bioquímica.

Un rasgo destacado de los linfocitos pedía un estudio más detallado. Las micrografías revelaban la presencia, en el citoplasma, de gran número de pequeños orgánulos (elementos subcelulares) oscuros. Parecían gránulos de almacenamiento, habituales en las células de secreción. Esos gránulos solventan con eficacia el problema de acumular y empaquetar una sustancia que elabore la propia célula y que deba liberarse con presteza en un momento dado. La liberación se realiza por exocitosis: los gránulos avanzan hacia la periferia celular, se funden con la membrana y descargan su contenido.

Varios investigadores habían advertido que, en una etapa temprana del proceso de muerte celular, los gránulos del linfocito se concentraban en la porción de célula que entraba en contacto estrecho con la célula diana. Abraham Kupfer y S. Jonathan Singer, de la Universidad de California en San Diego, y Dennert observaron entonces que el aparato de Golgi (la estructura encargada del empaquetamiento de los gránulos) se dirigía también hacia la región de contacto y que, inmediatamente después de producirse éste, varias proteínas del citoesqueleto (el entramado fibroso interno de la célula) se "reorientaban" hacia la célula diana, donde aportaban la fuerza motriz que dirigía el aparato de Golgi y los gránulos.

La reorientación del citopesqueleto y el movimiento de los gránulos y las pilas de vesículas del aparato de Golgi sólo se produce cuando el linfocito se une a una diana apropiada y en el sitio donde se registra esa unión. Roger Y. Tsien, de la Universidad de California en Berkeley, ha demostrado que la unión induce un incremento explosivo de la concentración celular de iones de calcio, que desencadena la exocitosis. John H. Yanelli y Victor H. Engelhard, de la Universidad de Virginia, han filmado microcinematogramas de la reorientación de los gránulos en el citoplasma y de su fusión con la membrana plasmática.

Las observaciones parecían indicar, en conjunto, que el contacto con la diana oportuna instaba a la célula asesina a dirigir su aparato excretor contra la víctima y dispararle el agente letal contenido en sus gránulos. Pero antes de identificar el proyectil, había que demostrar que, en verdad, procedía de los gránulos.

Por consiguiente, el primer paso consistió en aislar los gránulos y comprobar si, por sí solos, eran capaces de inducir la muerte. Así lo hicieron, independientemente, Henkart y Podack y nuestro grupo. En particular, nuestro equipo se sirvió de técnicas de fraccionamiento subcelular, que persiguen separar los componentes celulares y determinar cuál de ellos contiene una enzima determinada o desempeña cierta función. Disgregamos los linfocitos exterminadores sometiéndolos a presión en nitrógeno gaseoso. Colocamos los restos celulares en un gradiente de densidades de partículas inertes y los centrifugamos a alta velocidad. Los orgánulos se dispusieron en diversas bandas, en función de sus densidades. Examinamos por microscopía electrónica todas las bandas y analizamos su actividad enzimática y su capacidad de matar células.

Una de las fracciones, que, vista al microscopio electrónico, casi sólo contenía orgánulos, mostraba cierto enriquecimiento en la actividad enzimática y presentaba una potente actividad destructora: al mezclar esos gránulos con glóbulos rojos o células tumorales en un medio que contuviera iones calcio, las células morían a los pocos minutos. Las electromicrografías revelaban que la superficie celular presentaba lesiones anulares, apenas distinguibles de las provocadas por las células exterminadoras intactas. Quedaba demostrado,

por tanto, que los gránulos contenían la secreción letal de las células exterminadoras.

Al poco tiempo se identificó ese agente letal. En 1985, en colaboración con Podack y Hans Hengartner, del Hospital Clínico de la Universidad de Zurich, encontramos una proteína que, por sí sola (y en presencia de calcio), reproducía las lesiones observadas en las membranas, así como el efecto destructor de las células exterminadoras intactas y de los gránulos. Para aislar y purificar la proteína pasamos extractos de gránulos a través de columnas cromatográficas que separan las proteínas en función de su carga eléctrica y peso molecular y comprobamos si las proteínas así separadas lisaban los glóbulos rojos (es decir, degradaban su membrana y los reventaban). De forma independiente, Danielle Masson y Jürg Tschopp, de la Universidad de Lausana, aislaron también la proteína exterminadora.

Hasta la fecha, en los gránulos de los linfocitos *T* citotóxicos o células exterminadoras naturales sólo se ha descubierto una proteína perforadora, a menudo denominada perforina, cuyo peso molecular es de 70.000 dalton. Cuando se exponen a la perforina en presencia de calcio, las células se lisan en pocos minutos. Por el contrario, si los iones de calcio se añaden a la perforina antes de que ésta entre en contacto con las células, desaparece la actividad exterminadora de la proteína. El efecto, en apariencia paradójico, revela importantes detalles sobre el modo de acción de la perforina.

Una vez excretadas por la célula exterminadora, las moléculas de 70 kilodalton se insieren en la membrana de la célula diana donde, en presencia de iones de calcio, sus monómeros (unidades) polimerizan, es decir, se unen unos a otros. El polímero puede adoptar diversas configuraciones; en condiciones óptimas, el producto final semeja un cilindro. Al microscopio electrónico, visto en sección transversal, parece un anillo; en sección longitudinal se observan dos líneas paralelas. El diámetro interior del anillo, como apuntaron Podack y Dennert, oscila entre cinco y 20 nanómetros.

Para que la perforina lesione la célula diana, la polimerización mediada por calcio debe registrarse en la membrana celular, pues sólo puede inserirse en ésta el monómero; si la polimerización tiene lugar en la solución, sin membrana cerca, el polímero no podrá entrar en ésta y, por consiguiente, tampoco podrá matar. Salta a la vista el efecto protector de ese proceder. La perforina secretada al medio extracelular o al torrente sanguíneo, donde abunda el calcio, se polimeriza rápidamente y se inactiva, con lo que viene a eliminarse la posibilidad de daño "accidental" de células que no deban sufrirlo.

Por el contrario, en las células que sí constituyen objetivos a atacar, los canales producidos por la polimerización provocan cambios rápidos y apreciables. Salvo cuando deben excretarse, la membrana plasmática de las células retiene en el interior proteínas y demás macromoléculas y segrega ciertos iones, favoreciendo la entrada de algunos y entorpeciendo la de otros. La separación de iones positivos y negativos genera un potencial eléctrico a través de la membrana. Cuando se taladra la membrana, los gradientes electroquímicos de iones y agua tienden a equilibrarse y se produce una caída del potencial de membrana. Si los agujeros son de pequeño tamaño, tiene lugar, además, el denominado efecto Donnan. Las macromoléculas no pueden atravesar la membrana; el agua y las sales del fluido extracelular tienden a moverse hacia el lado donde se encuentran las proteínas (el interior celular) y la célula acaba estallando.

Clavando microelectrodos en las células diana pudimos medir una caída significativa del potencial de membrana al poco de suministrarse la perforina. Con un equipo electrónico especialmente sensible logramos incluso medir la corriente iónica que atravesaba cada poro. Los resultados coincidían con las predicciones del efecto Donnan. Las mediciones demostraban, además, que los agujeros abiertos por la perforina eran estructuras estables, que constituían vías de paso a través de la membrana. Averiguamos qué iones y pequeñas moléculas atravesaban la membrana dañada y estimamos que el diámetro interno funcional de los poros oscilaba entre uno y 10 nanómetros (el diámetro observado en las micrografías era, como se recordará, de entre cinco y 20 nanómetros).

Ante la actuación exterminadora de la periforina, por lo que parece indiscriminada, ¿cómo explicar la especificidad de acción de los linfocitos? Hemos mencionado ya que la polimerización de la proteína inducida por el calcio impide la lesión "accidental" por parte de la perforina que escapa del entorno linfocito-célula diana. Por otro lado, la capacidad del linfocito para reconocer las células pertinentes (las que

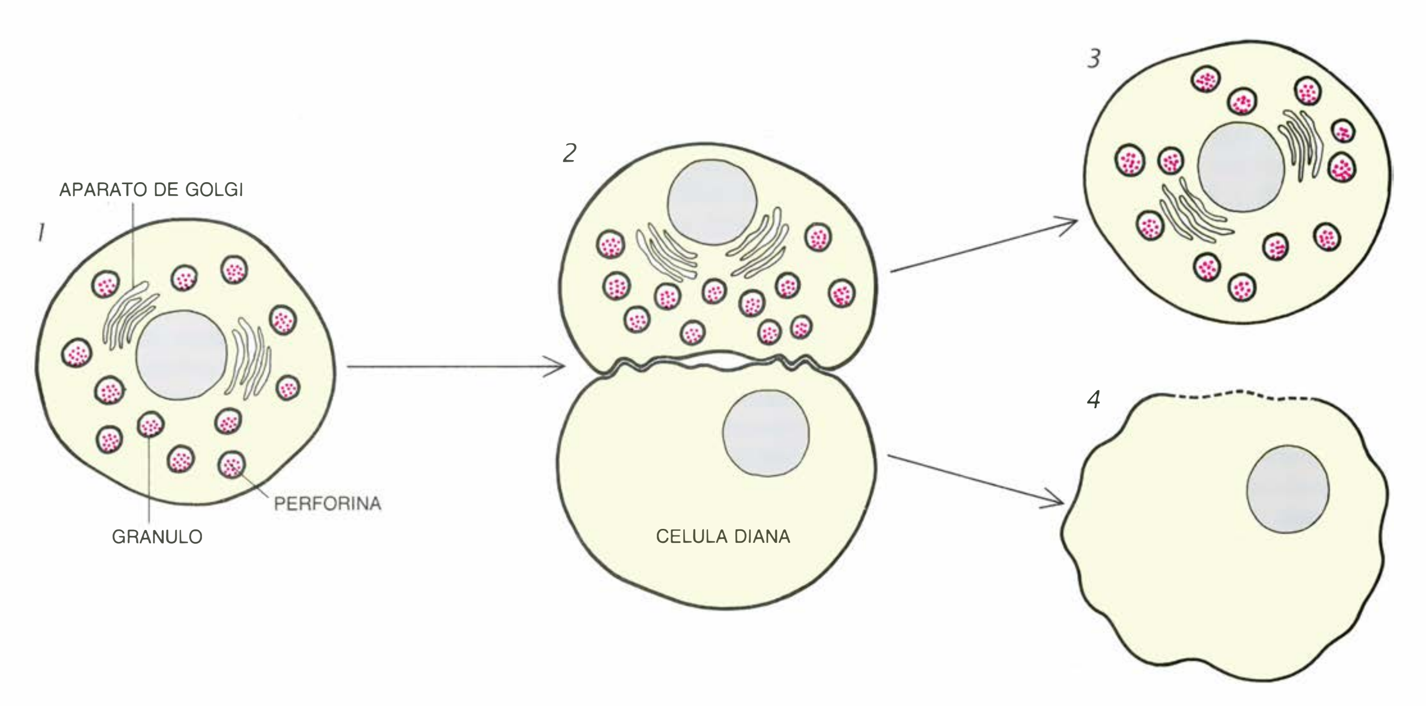








3. LESIONES TUBULARES de consecuencias mortales; se trata de canales, o poros, de un diámetro interior que oscila entre los cinco y los 20 nanómetros (milonésimas de milímetro). En electromicrografías de membrana teñida en negativo, esos poros ofrecen un aspecto anular o de líneas paralelas, según la orientación del corte. El aspecto de las lesiones es muy semejante, con independencia de que las hayan producido linfocitos intactos (*a*), gránulos aislados (*b*) o perforina purificada a partir de gránulos (*c*). Una proteína aislada de la ameba *Entamoeba histolytica* produce poros más pequeños, de dos o tres nanómetros de diámetro (*d*).



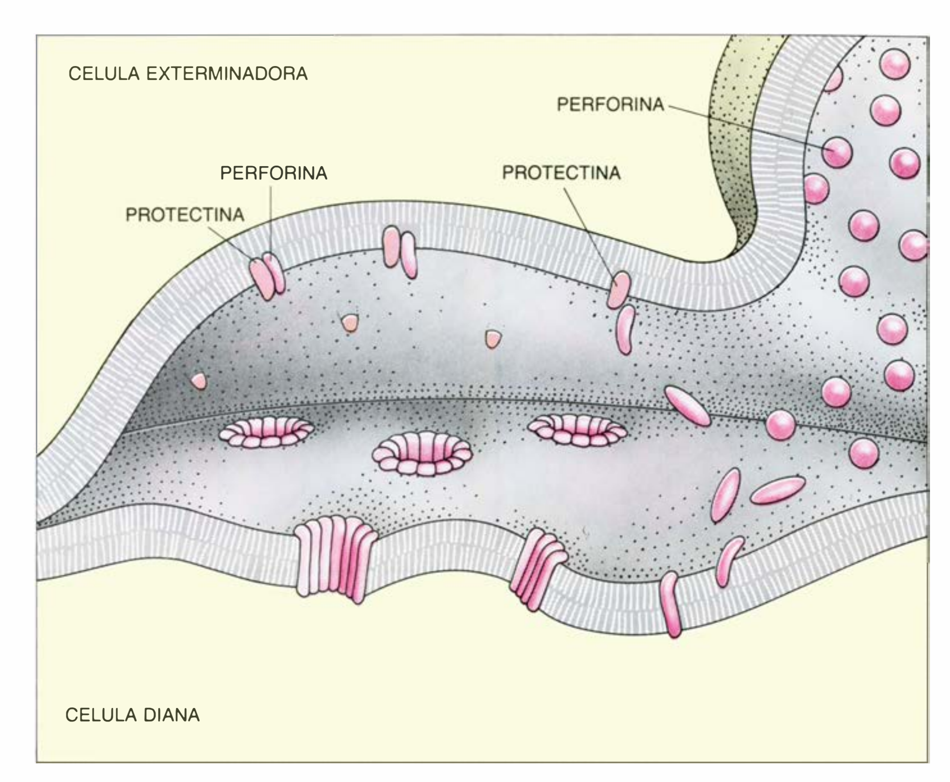
4. ETAPAS DEL PROCESO DE EXTERMINIO que se conocen desde hace algún tiempo. El linfocito exterminador (*1*) reconoce la célula diana (que suele portar antígenos que la marcan) y se adhiere fuertemente a ella (*2*). Al establecerse el contacto, los gránulos celulares y el complejo de Golgi se reorientan hacia la diana. Se segrega perforina, que agujerea la membrana de la víctima (*véase la figura 5*). Tras el lanzamiento de sus proyectiles letales, la célula exterminadora se despega de la víctima y parte hacia un nuevo ataque (*3*); la célula afectada muere a los pocos minutos, siguiendo un proceso letal programado.

5. DETALLES DEL PROCESO DE EXTERMINIO descubiertos recientemente. El incremento de los niveles de calcio —inducido por la unión de la célula exterminadora con su víctima (*1*)— desencadena la exocitosis de los gránulos: éstos se funden con la membrana (*2*) y descargan perforina (*3*) en el angosto espacio colindante con la víctima. El calcio altera allí la configuración de las moléculas de perforina, o monómeros (*4*), que se adhieren a la membrana de la célula diana (*5*) y se insertan en ella (*6*). Los monómeros se polimerizan, como las duelas de un barril (*7*), formando poros (8) por donde entran agua y sales.

exhiban, por ejemplo, antígenos víricos o tumorales) impide el exterminio "voluntario" de células que no constituyen objetivos. En otras palabras, la especificidad del proceso se apoya sólo en la necesidad de establecer un contacto íntimo, lo que a su vez depende de la unión del verdugo con su víctima por medio de la interacción entre los antígenos de la célula diana y los receptores del linfocito.

¿Qué impide que la célula asesina se autoaniquile? No puede ser la necesidad del contacto estrecho, pues su membrana está expuesta de continuo a la perforina. Según han demostrado recientemente Chau-Ching Liu, de nuestro laboratorio, y uno de los autores (Young), en colaboración con Clark, la perforina purificada es incapaz, por sí sola, de matar células *T* citotóxicas o exterminadoras naturales. Aunque se ignora cuál sea el mecanismo de autoprotección que lo impide, hemos avanzado nuestra propia hipótesis: en la membrana de la célula exterminadora habría una proteína especial, que denominamos protectina, muy parecida a la perforina. La homología entre ambas instaría una "polimeración defectuosa": la protectina se combinaría de inmediato con cualquier monómero de perforina que llegara a la membrana de la célula exterminadora e impediría su inserción en la membrana y la polimerización entre unidades de perforina, que culmina con la formación de poros. Estamos ahora comprometidos en un proyecto de búsqueda intensiva de esa hipotética proteína.

Los estudios recientes que hemos citado se realizaron, todos ellos, en cultivos de laboratorio de linfocitos de ratón. Cabía la posibilidad de que la perforina constituyera una curiosidad artificial, no la verdadera arma que el linfocito utiliza *in vivo*. En colaboración con Bice Perussia, del Instituto Wistar de Philadelphia, y Liu, buscamos perforina en linfocitos frescos de sangre humana. En vano. Sin embargo, cuando estimulábamos, *in vitro*, los linfocitos con interleucina-2, proliferaban y sintetizaban perforina. El efecto se observaba tanto en células *T* citotóxicas como en exterminadoras naturales. Leora S. Zalman y Hans J. Muller, del Instituto de Investigación de la Clínica Scripps, y sus colegas obtuvieron resultados similares. Probablemente ese efecto de la interleucina-2 refleje el que ejerce en el organismo, donde la sintetizan las células *T* coadyuvantes y desencadena numerosas respuestas inmunológicas.

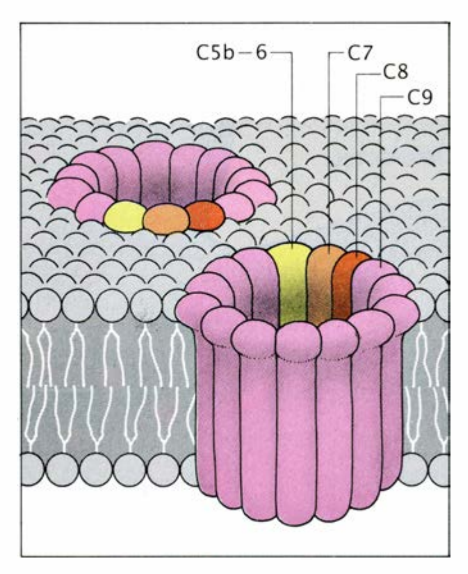


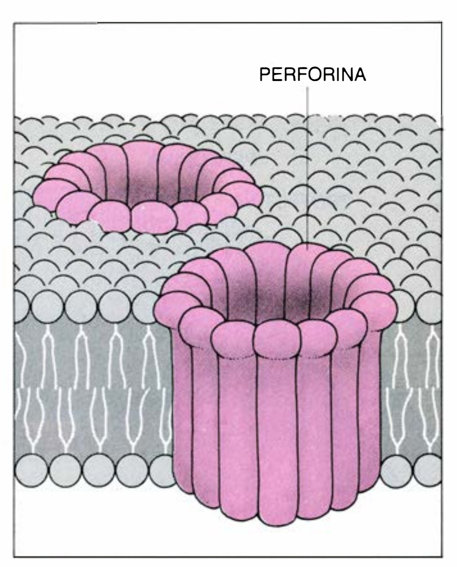
6. MECANISMO AUTOPROTECTOR que impide que la célula exterminadora se lesione a sí misma, según proponen los autores. La protectina, una proteína muy semejante a la perforina, se concentraría en la membrana del linfocito; dada la homología entre ambos polipéptidos, los monómeros de perforina se unirían a la protectina, no pudiendo, de ese modo, polimerizar ni crear poros en la membrana de la célula asesina.

El efecto observado *in vitro* quizás explique el efecto clínico aparente de la interleucina-2, descrito en 1984 por Steven A. Rosenberg, del Instituto Nacional estadounidense del Cáncer. Ideó una nueva terapia para ciertos tumores incurables: extraía linfocitos de la sangre del paciente, los estimulaba fuera del organismo con interleucina-2 y los volvía a infundir en el paciente. Se suponía que, de ese modo, se incrementaba la capacidad exterminadora de los linfocitos. Se ha observado cierta regresión del tumor en algunos pacientes, pero el tratamiento resulta muy tóxico y, por ello, se encuentra aún en fase experimental. No cabe duda de que un mayor conocimiento del proceso de inducción de la expresión de la perforina por parte de los linfocitos exterminadores colaboraría en el diseño de una inmunoterapia contra el cáncer.

Parece demostrado que las células exterminadoras matan practicando agujeros en las membranas de sus víctimas, pero puede que los linfocitos posean también otras armas. John H. Russell, de la Universidad de Washington en San Luis, ha propuesto un modelo de muerte celular por "desintegración interna", basado en la observación de que, en una etapa precoz del proceso de agresión, la membrana que rodea el núcleo celular se rompe y el ADN nuclear se desintegra en pequeños fragmentos. Russell y otros creen que la muerte de la célula agredida es consecuencia de la rotura del ADN, instada por alguna señal procedente de la célula exterminadora. El modelo no se encuentra muy pormenorizado, pero nuestros hallazgos no lo invalidan. Quizás existan varios mecanismos de exterminio celular.

En efecto, hemos encontrado que ciertas líneas de células *T* citotóxicas mantenidas en cultivo durante algún tiempo conservan la capacidad exterminadora pese a no segregar perforina. ¿Segregan otras substancias? Disponemos de pruebas, aún por confirmar, de que en las células exterminadoras existe una molécula (leucalexina la hemos bautizado) capaz de matar células al cabo de varias horas (en vez de minutos). Pudiera ocurrir que los poros abiertos por la perforina, cuya estrechez sólo dejan pasar sales y agua, se ensancharan ocasionalmente lo suficiente (por una ulterior polimerización) para permitir el paso de una proteína (la leucalexina, quizá) que escinda el ADN. O, por el contrario, durante el proceso de apertura de los poros podría introducirse alguna proteína capaz de degradar el ADN. Este podría ser el caso si aquel proceso estimulase





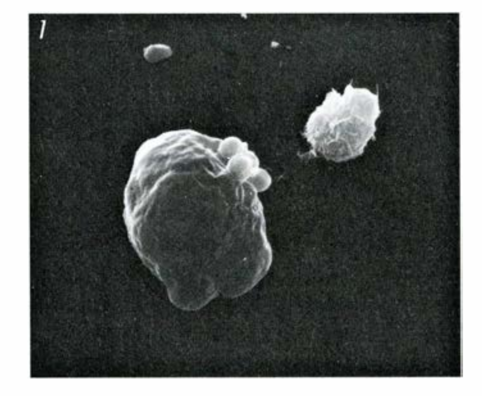
7. SISTEMA INMUNOLOGICO HUMORAL, que construye poros muy parecidos a los que abren los linfocitos del sistema celular. La unión anticuerpo-célula diana desencadena una cascada de activaciones de proteínas del sistema del complemento. Tras la unión de la proteína C5b-6 a la membrana, se le agregan la C7, C8 y varias proteínas C9. Entre todas forman un poro (*izquierda*). Las aberturas creadas por las células asesinas, por el contrario, son agregaciones de una sola proteína, el monómero de perforina (*derecha*).

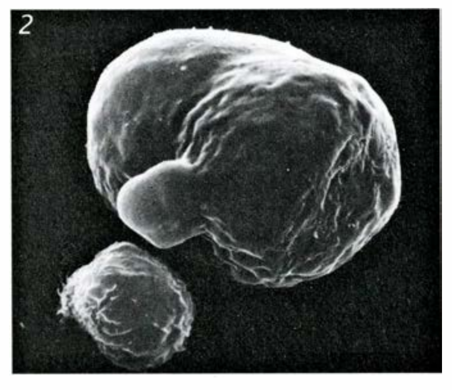
la endocitosis, el mecanismo mediante el cual las macromoléculas entran en las células.

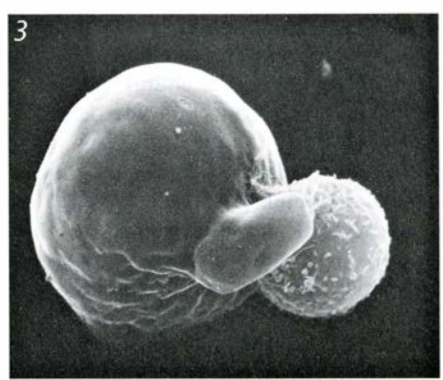
Puede que la formación de poros no sea el único mecanismo utilizado por los linfocitos exterminadores para matar, pero resulta muy eficaz. Lo mismo en el sistema inmunológico humoral que en el inmunológico celular: se trata del resultado final de la cascada del complemento, que mata a las bacterias marcadas por los anticuerpos. Las proteínas terminales de la cascada se polimerizan y forman agujeros, parecidos a los que abre la perforina, de un diámetro interior de 10 nanómetros. Podack y nuestro grupo, por un lado y, Tschopp, por otro, hemos hallado que las proteínas terminales del complemento presentan una significativa homología con la perforina. Sus secuencia de aminoácidos (los sillares de las proteínas) son idénticas en algunos segmentos. Tal similitud entre elementos de los sistemas inmunológicos humoral y celular no puede ser casual. En nuestra opinión, las proteínas exterminadoras de ambos sistemas deben poseer un antecesor común, divergiendo luego y especializándose en sus respectivas funciones. Cuando, por evolución, aparece un mecanismo que funciona eficazmente, la selección natural tiende a conservarlo.

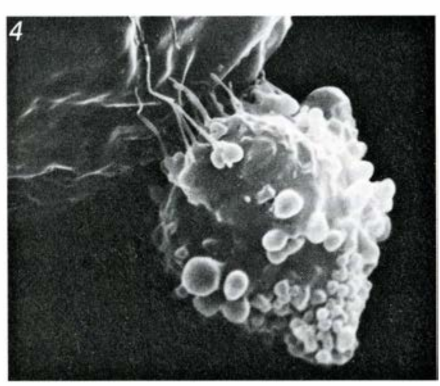
Las células exterminadoras no son patrimonio del sistema inmunológico celular, ni de los organismos de complejidad superior. Numerosas especies, por ejemplo, ciertas bacterias, hongos y protozoos parásitos, son excelentes exterminadores de células. Entre las armas comunes a sus respectivos arsenales se cuentan proteínas que abren agujeros en la superficie de las víctimas. Para ampliar nuestros conocimientos sobre cómo matan los linfocitos a sus víctimas, decidimos analizar una de esas especies. Ciertas estirpes virulentas de la ameba *Entamoeba histolytica* infectan el intestino humano y provocan una grave disentería, extendiéndose a menudo a otros órganos. En cultivos de laboratorio, las amebas matan una amplia variedad de células; en todos los casos se unen antes estrechamente a sus víctimas.

En 1982, Carlos Gitler, del Instituto Weizmann de Israel, y los autores aislaron, sin previo acuerdo, una proteína de *E. histolytica* capaz de abrir poros en la membrana superficial de las células diana. Esta nueva proteína perforadora resulta extraordinariamente letal. La PFP, así la denominamos, es mucho menor que la perforina (14.000 dalton), pero se polimeriza también y causa extensas lesiones tubulares en la membrana celular, de un diámetro interior de dos a tres nanómetros. Según parece, el microorganismo mata a sus víctimas uniéndose a ellas y tachonándolas de agujeros practicados con polímeros de PFP. La similitud entre los mecanismos que utilizan las células exterminadoras que atacan al organismo y los de las células exterminadoras que lo defienden parece un hermoso ejemplo de convergencia evolutiva. Las amebas y los linfocitos humanos han desarrollado, independientemente, proteínas que desempeñan idéntica función perforadora con un mismo objetivo: matar células.









8. AMEBAS PARASITAS, que se sirven, para matar, de una proteína de efectos semejantes a los de la perforina. En estas electromicrografías de barrido realizadas por Gilla Kaplan, *Entamoeba histolytica* (la mayor de las células) se aproxima a su víctima, un macrófago del sistema inmunológico (*1*), y extiende un pseudópodo (*2*). Una vez establecido el contacto, la ameba podría acabar con su presa por fagocitosis, o ingestión (*3*), o segregando la proteína perforadora letal. En este caso, la célula atacada se hincha (*4*) y muere.

Realidad del mundo cuántico

Einstein mantenía que las descripciones mecánico-cuánticas de los sistemas físicos eran incompletas. Determinados experimentos muestran que andaba equivocado y que debe aceptarse la extraña naturaleza del mundo cuántico

Abner Shimony

Vivimos en una época interesante, en la que los resultados experimentales comienzan a dilucidar cuestiones filosóficas. En ningún campo los resultados han sido tan espectaculares como en mecánica cuántica. La teoría se ha venido confirmando con largueza desde la década de 1920, a medida que sus predicciones sobre los fenómenos atómicos, moleculares, nucleares, ópticos, de estado sólido y de partículas elementales resultaron acertadas. Mas, a pesar de esos éxitos, el carácter singular y contrario a la intuición de la mecánica cuántica ha determinado que algunos investigadores, Einstein incluido, sostengan que las descripciones mecánico-cuánticas de los sistemas físicos son incompletas y deben complementarse. Experimentos recientes indican que tal opinión es, muy probablemente, errónea. Los resultados experimentales revelan, con mayor nitidez que nunca, que vivimos en un extraño "mundo cuántico" que desafía la interpretación cómoda y de sentido común.

Citemos algunos de los nuevos hallazgos que debemos empezar a aceptar. Primero, dos entidades, distantes muchos metros y que no poseen ningún mecanismo para comunicarse entre sí, pueden, a pesar de todo, "entablar relaciones": pueden presentar unas correlaciones sorprendentes en su comportamiento, de suerte que la medición realizada en una entidad parece afectar instantáneamente el resultado de la medición en la otra. El fenómeno no admite justificación desde el punto de vista clásico, pero encaja perfectamente en el marco de la mecánica cuántica. Segundo, un fotón, la unidad fundamental de la luz, puede comportarse como una partícula o como una onda y persistir en su estado de ambigüedad hasta que se acometa una medición. Si se mide una propiedad corpuscular, el fotón se comporta como una partícula; si se mide una propiedad ondulatoria, lo hará como una onda. Que el fotón sea una onda o una partícula queda indefinido hasta que se especifica el dispositivo experimental. Por último, la idea de indefinición no se restringe, en absoluto, a los dominios atómicos o subatómicos. Los investigadores han descubierto que un sistema macroscópico puede, en determinadas circunstancias, existir en un estado en el que un parámetro macroscópico posea un valor indefinido. Cada uno de estos hallazgos altera de raíz la manera como percibimos el mundo.

Una comprensión de estos experimentos y sus implicaciones filosóficas exige cierta familiaridad con las ideas básicas de la mecánica cuántica. El concepto de estado cuántico, o función de onda, es esencial en cualquier discusión de la teoría. El estado cuántico especifica, hasta donde es posible, todas las cantidades de un sistema físico. La precaución del "hasta donde es posible" introducida en la frase anterior resulta decisiva, porque, según la mecánica cuántica, no todas las cantidades de un sistema tienen simultáneamente valores definidos. El conocido principio de incertidumbre de Heisenberg, que establece que la posición y el momento de una partícula no pueden definirse simultáneamente, constituye quizás el ejemplo más socorrido de esta aseveración.

Lo que el estado cuántico de un sistema proporciona de manera inequívoca es la probabilidad de cada resultado posible de cualquier experimento que se desarrolle en el sistema. Si la probabilidad es 1, el resultado se producirá sin duda; si la probabilidad es cero, no habrá tal resultado, con la misma seguridad absoluta. Ahora bien, si la probabilidad es un número entre cero y 1, no podremos afirmar, de ningún caso particular, cuál será el resultado. Todo lo que puede decirse es cuál será, en promedio, el resultado de un experimento determinado realizado en un número elevado de sistemas idénticos.

Imaginemos, por ejemplo, que medimos un fotón. Se fija el estado cuántico de un fotón cuando se conocen tres cantidades: su dirección, su frecuencia y su polarización lineal (la dirección del campo eléctrico asociado al fotón). Un aparato adecuado para medir la polarización es una hoja de lámina polarizante. La versión ideal de la lámina transmitiría toda la luz que incide perpendicularmente sobre ella si estuviera linealmente polarizada a lo largo de cierta dirección de la lámina llamada eje de transmisión. La lámina bloquearía toda la luz perpendicularmente incidente sobre ella, si ésta se hallara polarizada linealmente en dirección perpendicular al eje de transmisión.

Se pueden acometer diversos experimentos girando la lámina polarizadora de diferentes maneras. Si el fotón está polarizado linealmente según el eje de transmisión, la probabilidad de que se transmita es 1. Si el fotón está polarizado linealmente en dirección perpendicular al eje de transmisión, la probabilidad de que se transmita es cero. Otra consecuencia de la mecánica cuántica, que trasciende lo expuesto hasta ahora, es que si el fotón está polarizado linealmente formando cierto ángulo con el eje de transmisión, comprendido entre cero y 90 grados, la probabilidad de transmisión es un número entre cero y 1 (exactamente, el cuadrado del coseno de dicho ángulo). Con una probabilidad de 0,5, por dar una cifra, de 100 fotones polarizados linealmente según dicho ángulo se transmitirán en promedio 50.

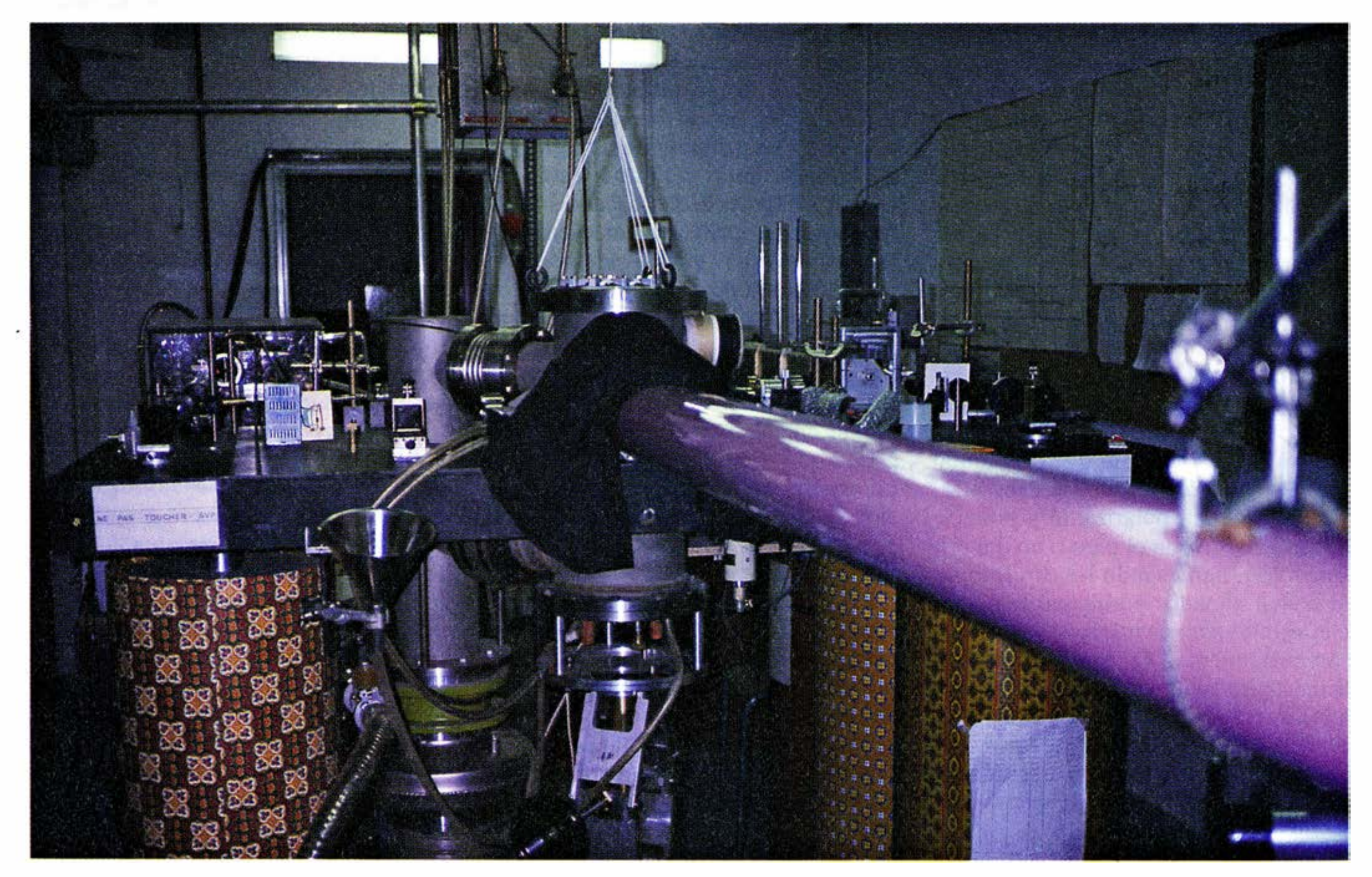
El principio de superposición constituye otra idea fundamental de la mecánica cuántica. Afirma que, a partir de dos estados cuánticos cualesquiera

de un sistema, pueden formarse otros estados superponiéndolos. En un contexto físico, la operación corresponde a formar un nuevo estado que se "solape" con cada uno de los estados que lo constituyeron. Para ilustrar esa noción, consideraremos dos estados cuánticos de un fotón en los que la dirección de la polarización del fotón en el primer estado es perpendicular a la dirección de la polarización del fotón en el segundo. Se pueden construir entonces innumerables estados en los que la polarización del fotón forme cualquier ángulo comprendido entre las dos direcciones perpendiculares.

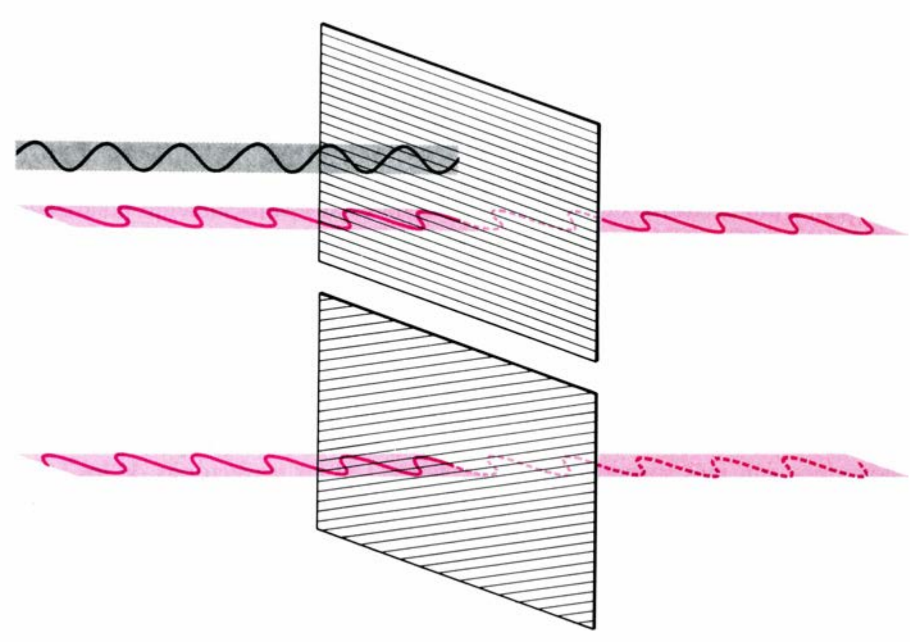
Bastan esas dos ideas básicas —la indefinición y el principio de superposición—, para advertir que la mecánica cuántica entra en conflicto frontal con el sentido común. Si el estado cuántico de un sistema constituye una descripción completa del sistema, entonces una cantidad que tenga un valor indefinido en dicho estado cuántico será objetivamente indefinida; no se trata, pues, de que el valor le resulte desconocido al científico que pretende explicar dicho sistema. Además, como el resultado de la medición de una magnitud objetivamente indefinida no está determinado por el estado cuántico, a pesar de que éste posea la información completa acerca del sistema, el resultado será fruto exclusivo de la casualidad objetiva. (Casualidad que no debe confundirse con la impredictibilidad por parte del científico.) Por último, la probabilidad de cada resultado posible de la medición es una probabilidad objetiva. La física clásica no se aparta del sentido común de manera tan radical.

La mecánica cuántica nos ofrece implicaciones aún más sorprendentes, si el sistema está formado por dos partes correlacionadas. Supongamos que dos fotones se alejan en sentidos opuestos. Un posible estado cuántico del par de fotones será el estado en el que ambos se hallan linealmente polarizados según un eje vertical. Otro posible estado es aquel en el que ambos están linealmente polarizados según un eje horizontal. Nada hay de extraño o sorprendente en ninguno de esos estados cuánticos de dos fotones, dejando aparte las peculiariedades de los estados de un fotón antes mencionadas. Pero si se introduce el principio de superposición, pueden suceder efectos extraños.

En particular, con el principio de superposición podemos formar un estado cuántico que contenga la misma cuantía de estado verticalmente polarizado que de estado horizontalmente polarizado. El nuevo estado desempeñará un papel destacado en lo que sigue, de manera que se le dará un nombre, Ψ_0 (ya que la letra griega psi suele usarse para designar estados cuánticos). Las propiedades de Ψ_0 son muy especiales. Imaginemos, por ejemplo, que insertamos, en las trayectorias de los fotones, láminas polarizantes con los ejes de transmisión orientados verticalmente. Por contener Ψ_0 cantidades iguales de los estados polarizados vertical y horizontalmente, habrá una probabilidad de 0,5 de que ambos fotones se transmitan a través de sus láminas respectivas y otra probabilidad de 0,5 de que ambos queden bloqueados. Lo que no puede suceder es que un fotón se transmita y el otro quede bloqueado. En otras palabras, los resultados de los experimentos de polarización lineal de los



1. PRUEBAS EXPERIMENTALES que van aclarando aspectos de la mecánica cuántica que antes estaban limitados al ámbito restringido de la discusión filosófica. En este experimento, realizado por Alain Aspect y sus colaboradores del Instituto de Optica de la Universidad de París, los láseres de cada lado de la imagen excitan átomos de calcio de la cámara de vacío (*centro*). Cada átomo torna a su estado no excitado emitiendo un par de fotones. (El fotón es la unidad fundamental de la luz.) Los fotones viajan en sentidos opuestos a través de un tubo de 6,5 metros; los que atraviesan los analizadores de polarización inciden sobre fotodetectores. La mecánica cuántica predice la existencia de finas correlaciones entre las polarizaciones de los fotones emitidos en sentidos opuestos; la correlación se halla en conflicto con las teorías clásicas conocidas como modelos de variables ocultas. El experimento confirmó la mecánica cuántica.



2. INDEFINICION de un sistema cuántico, ilustrado para un fotón. Una hoja de lámina polarizadora transmite toda la luz incidente sobre ella en ángulo recto si la luz se halla linealmente polarizada según cierta dirección de la lámina, el llamado eje de transmisión (*rayado*). Este estado de polarización del fotón se representa por la línea ondulada coloreada de arriba. La lámina bloquea toda la luz que incide sobre ella en ángulo recto si la luz está linealmente polarizada en dirección perpendicular al eje de transmisión (*línea gris ondulada*). Supongamos que un fotón se encuentra linealmente polarizado en cierto ángulo comprendido entre cero y 90 grados, respecto del eje de transmisión (*abajo*): no queda definido si el fotón se transmitirá o no; la probabilidad de transmisión es un número entre cero y 1 (el cuadrado del coseno del ángulo).

dos fotones guardan una correlación estricta.

Los resultados serán idénticos si orientamos las láminas polarizantes según un ángulo de 45 grados con respecto a la horizontal: ambos fotones se transmitirán o ambos se bloquearán. Lisa y llanamente, no puede ocurrir que un fotón se transmita y se bloquee el otro. De hecho, no importan las orientaciones de las láminas siempre que coincidan entre sí; los resultados de los experimentos de polarización lineal manifiestan una correlación estricta en una familia infinita de posibles experimentos. (Obvio es señalar que sólo puede acometerse uno de esos experimentos.) Podría decirse que el segundo fotón de la pareja "sabe" si debe atravesar su lámina polarizante y ponerse así de acuerdo con el paso o no del primer fotón, aun cuando los dos fotones se hallen alejados y ninguno tenga un mecanismo para comunicarle al otro su comportamiento. En esas situaciones, la mecánica cuántica pone en aprieto la noción relativista de localidad, según la cual ningún suceso puede producir efectos que se propaguen más deprisa que la luz (en particular, efectos instantáneos a distancia).

Hemos de destacar que las implicaciones reseñadas hasta ahora —indefinición objetiva, casualidad objetiva, probabilidad objetiva y no localidad— dependen, de manera crucial, de la premisa siguiente: el estado cuántico de un sistema dado constituye una descripción completa de éste. Sin embargo, algunos físicos teóricos han mantenido que el estado cuántico se limita a describir un conjunto de sistemas preparados de modo uniforme; ésta sería la causa de que puedan hacerse buenas predicciones acerca de los resultados estadísticos del mismo experimento realizado en todos los componentes de dicho conjunto. Al propio tiempo, continúa la argumentación, los distintos componentes del conjunto difieren entre sí en aspectos no indicados por el estado cuántico, y ésta sería la razón por la que diferirían los resultados de un experimento a otro. Las propiedades de cada sistema no especificadas por el estado cuántico se denominan variables ocultas.

Si los teóricos de las variables ocultas andan en lo cierto, no existe la indefinición objetiva; sólo ignorancia por parte del científico acerca de los valores de las variables ocultas que caracterizan un sistema determinado. Tampoco habrá casualidad objetiva al no darse probabilidades objetivas. Y lo que es más importante, las correlaciones cuánticas entre sistemas alejados no encierran mayor sorpresa que la que pueda ofrecer la concordancia entre dos periódicos impresos en la misma rotativa y enviados a ciudades distintas.

En 1964, John S. Bell, del CERN, el laboratorio europeo de física de partículas, mostró que las predicciones de los modelos locales de variables ocultas eran incompatibles con las predicciones de la mecánica cuántica. La reflexión sobre algunos modelos de variables ocultas de David Bohm, del Birkbeck College de Londres, y de Louis de Broglie condujo a Bell a demostrar este importante teorema: ningún modelo que sea local (en un sentido cuidadosamente especificado) puede estar de acuerdo con todas las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica. En otras palabras, hay situaciones físicas en que las predicciones de la mecánica cuántica no están de acuerdo con las de cualquier modelo local de variables ocultas [véase "Teoría cuántica y realidad", por Bernard d'Espagnat; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 1980].

Nos haremos una idea, siquiera sea parcial, del teorema de Bell, volviendo al estado cuántico Ψ_0. Según se indicó antes, los resultados de los experimentos de polarización lineal realizados sobre un par de fotones en dicho estado deben guardar una correlación estricta cuando el ángulo entre los ejes de transmisión de las dos láminas polarizantes es de cero grados (como sucede en el caso en que ambos ejes se hallan alineados verticalmente). No sorprenderá, pues, saber que, para el estado Ψ_0, existe siempre, por lo menos, una correlación parcial entre los resultados, con independencia de cuál sea el ángulo entre los ejes de transmisión. (Concretamente, si se transmite uno de los fotones a través de su lámina polarizante, la probabilidad de que el otro fotón se transmita a través de su lámina equivale al cuadrado del coseno del ángulo entre ambos ejes de transmisión.)

En consecuencia, un modelo de variables ocultas que esté de acuerdo con todas las predicciones estadísticas de la mecánica cuántica deberá asignar, con suma finura, cantidades a cada par de fotones del conjunto al objeto de garantizar las correlaciones estrictas o parciales para cada posible ángulo entre los ejes. Ahora bien, la condición de localidad exige que las cantidades asignadas a cada fotón de un par sea independiente de la orientación de la lámina polarizante sobre la que incide el otro fotón e independiente, también, de que el otro fotón pase o no. Es esta condición de localidad la que imposibilita, en gran medida, los delicados ajustes que serían necesarios para reproducir todas las correlaciones, estrictas y parciales, que implica Ψ_0.

El teorema de Bell demuestra que, en principio, se puede determinar por vía experimental cuál de las dos tiene razón: la mecánica cuántica o los modelos locales de variables ocultas. Convenía verificarlo porque, a pesar de la ingente acumulación de pruebas que confirmaban la mecánica cuántica en los días en que Bell demostró su teorema, los puntos cruciales en los que la mecánica cuántica resultaba del todo irreconciliable con el sentido común no se habían comprobado todavía.

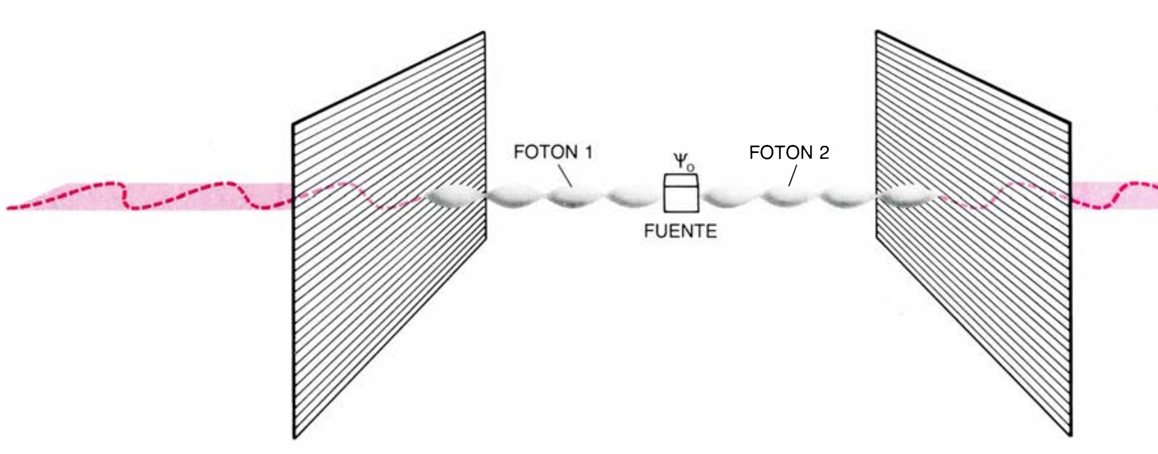
En 1969, John F. Clauser, adscrito por entonces a la Universidad de Columbia, Michael A. Horne, de la de Boston, Richard A. Holt, a la sazón en la Universidad de Harvard, y el autor de este artículo propusieron un plan para abordar la comprobación requerida. Debían obtenerse pares de fotones, con polarizaciones lineales correlacionadas, mediante la excitación de átomos hasta un estado inicial apropiado; a continuación, los átomos volverían al estado no excitado por emisión de dos fotones. Filtros y lentes asegurarían que, cuando los fotones salieran en sentidos opuestos, o casi opuestos, un fotón incidiría sobre un analizador de polarización y el otro incidiría sobre otro analizador. Variando las orientaciones de cada analizador entre dos posibilidades y registrando el número de pares de fotones transmitidos en cada una de las cuatro combinaciones posibles de las orientaciones de los dos analizadores, podían acometerse mediciones de las correlaciones de transmisión entre los fotones de un par.

Sugerimos que servirían de analizadores de polarización los cristales de calcita o pilas de placas de vidrio, dada su eficacia, mayor que la de la lámina de polarización, a la hora de bloquear fotones polarizados perpendicularmente al eje de transmisión. Unos fotodetectores colocados detrás de los analizadores detectarían una fracción determinada de los fotones que atravesaran los analizadores. Si dos fotones, uno en cada detector, se registrasen en un intervalo de 20 nanosegundos (mil millonésimas de segundo), la probabilidad de que los hubiera emitido el mismo átomo sería bastante elevada. Las lentes recogerían los dos fotones que se hubieran emitido dentro de un ángulo finito; por consiguiente, el estado cuántico no sería exactamente el estado Ψ_0 que hemos examinado antes, sino un estado modificado Ψ_1, que conduciría también a correlaciones irreproducibles por ningún modelo local de variables ocultas.

El experimento fue realizado por Stuart J. Freedman y Clauser, de la Universidad de California en Berkeley, en 1972, por Edward S. Fry y Randall C. Thompson, de la Universidad de Texas A. & M., en 1975, y, después, por otros grupos. La mayoría de los resultados experimentales están de acuerdo con las correlaciones predichas por la mecánica cuántica y discrepan de los modelos de variables ocultas. Además, la fiabilidad de los experimentos que disienten es dudosa a causa de ciertos puntos débiles, muy sutiles, de su diseño.

Ello no obstante, todos los experimentos tenían, hasta hace muy poco, su talón de Aquiles que permitía mantener las esperanzas a los defensores incondicionales de los modelos de variables ocultas: los analizadores de polarización persistían en sus respectivas orientaciones durante intervalos aproximados de un minuto, tiempo suficiente para el intercambio de información entre los analizadores mediante algún mecanismo hipotético. En consecuencia, los defensores podían sostener que la teoría de la relatividad especial no implicaba la validez de la condición de localidad de Bell en la situación física de los experimentos. Por tanto, tales experimentos no constituían ningún banco de pruebas para decidir entre la mecánica cuántica y los modelos locales de variables ocultas.

Para acabar con ese punto débil, Alain Aspect, Jean Dalibard y Gérard Roger, del Instituto de Optica de la Universidad de París, realizaron un espectacular experimento en el que la elección entre las orientaciones de los analizadores de polarización se producía mediante conmutadores ópticos mientras los fotones se hallaban en vuelo. Ocho años de trabajo exigió el experimento, que concluyó en 1982. En él, cada conmutador es un frasquito de agua donde se generan ultrasónicamente y con periodicidad ondas estacionarias. Las ondas sirven de redes de difracción que pueden desviar con un alto rendimiento un fotón incidente. Si se conectan las ondas estacionarias, el fotón se desviará hacia un analizador que está orientado de una forma; si se desconectan, el fotón viajará sin desviarse hacia un analizador que está orientado de otra.



3. CORRELACIONES entre las polarizaciones de dos fotones. Se producen cuando los fotones se hallan en un estado especial llamado Ψ_0 (la letra psi del alfabeto griego). El nuevo estado se forma de la manera siguiente: se superpone el estado en que ambos fotones se encuentran linealmente polarizados según un eje vertical sobre el estado en el que ambos se hallan linealmente polarizados según un eje horizontal. El estado Ψ_0 contiene cantidades iguales del estado polarizado verticalmente y del estado polarizado horizontalmente. Imaginemos ahora que se insertan, en las trayectorias de los fotones, láminas polarizadoras con los ejes de transmisión orientados horizontalmente. Porque Ψ_0 posee idéntica cuantía de ambos estados, habrá una probabilidad del 50 por ciento de que los dos fotones se transmitan a través de sus respectivas láminas, y una probabilidad del 50 por ciento de que ambos queden bloqueados. Lo que no puede suceder es que se transmita un fotón y el otro se bloquee; los resultados de los experimentos de polarización lineal guardan una correlación estricta. De hecho, no importa cuál sea la orientación respectiva de las láminas, siempre y cuando ambas coincidan; diríase que el segundo fotón de la pareja "sabe" si debe atravesar su lámina polarizadora para concordar con el paso, o bloqueo, del primer fotón, incluso cuando los fotones están alejados. (Dibujos de Gabor Kiss.)

La conmutación entre las orientaciones dura unos 10 nanosegundos. Los generadores que abastecen a los dos conmutadores funcionan de modo independiente, aunque (desafortunadamente para la total definición del experimento) la operación es periódica y no aleatoria. Un analizador dista 13 metros del otro, de manera que una señal que avanzara a la velocidad de la luz (la máxima velocidad permitida por la teoría de la relatividad especial) invertiría 40 nanosegundos en recorrer ese intervalo. En consecuencia, la elección de la orientación del primer analizador de polarización no debería influir en la transmisión del segundo fotón a través del segundo analizador, ni la elección de la orientación del segundo analizador debería hacerlo en la transmisión del primer fotón a través del primer analizador. Se esperaba, pues, que el dispositivo experimental satisficiera la condición de localidad de Bell. De ello se infería que, de acuerdo con el teorema de Bell, habría violaciones de las predicciones de correlación de la mecánica cuántica en los resultados experimentales.

La verdad es que el experimento produjo el resultado opuesto. Los datos de las correlaciones concordaban, dentro del error experimental, con las predicciones mecánico-cuánticas que se calculan a partir del estado cuántico Ψ_1. Además, los datos diferían, en más de cinco desviaciones estándar, de los límites extremos permitidos, según el teorema de Bell, por cualquier modelo local de variables ocultas.

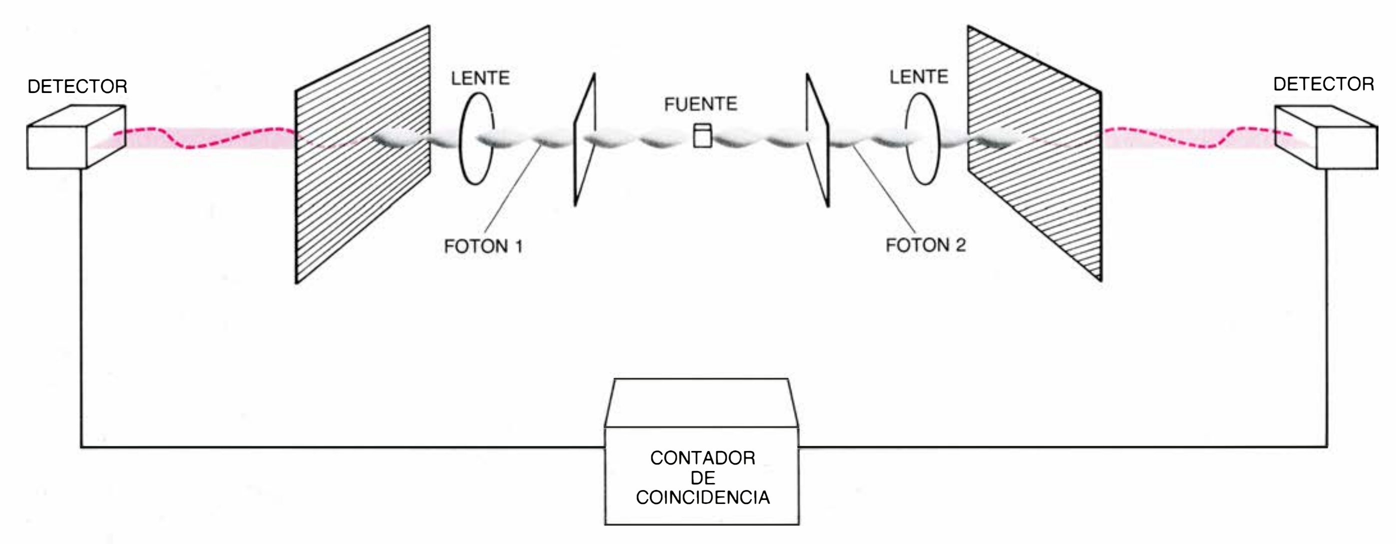
Aun cuando el experimento de Aspect y sus colaboradores no sea absolutamente definitivo, la mayoría de la gente considera que las perspectivas de invertir los resultados en futuros experimentos son mínimas. Parece poco probable que la familia de modelos locales de variables ocultas pueda salvarse. Las extrañas propiedades del mundo cuántico —indefinición objetiva, casualidad objetiva, probabilidad objetiva y no localidad —se mantendrán permanentemente afincadas en la teoría física.

Una de las propiedades más sorprendentes del mundo cuántico es la no localidad. Bajo ciertas circunstancias, una medición realizada en un fotón afecta manifiesta e instantáneamente el resultado de la medición sobre otro fotón; ¿puede ello aprovecharse para enviar un mensaje más deprisa que la velocidad de la luz? Por fortuna para la teoría de la relatividad especial, la respuesta es negativa. Sigue en pie una hipótesis subyacente a dicha teoría (que ninguna señal puede viajar más deprisa que la luz).

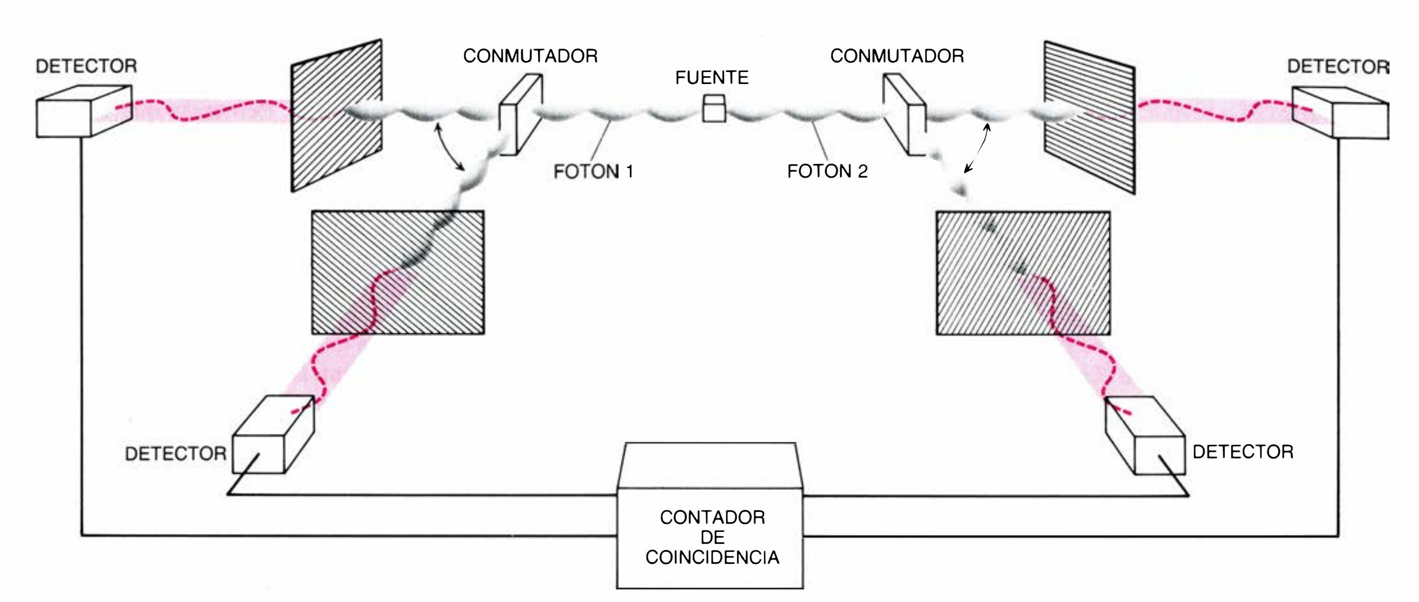
Razonemos brevemente la causa. Supongamos que dos personas deseen comunicarse mediante un dispositivo similar al utilizado para someter a prueba los modelos locales de variables ocultas. Entre uno y otro observador, se instala una fuente emisora de pares de fotones correlacionados. Cada sujeto posee un analizador de polarización y un fotodetector. Los observadores son libres de orientar a su arbitrio los ejes de transmisión de sus analizadores.

Imaginemos que ambos se ponen de acuerdo en alinear los ejes de transmisión verticalmente. Entonces, cada vez que se emita un par de fotones, habrá una estricta correlación en el resultado: ambos fotones atravesarán los analizadores o ambos quedarán bloqueados. Pero la correlación estricta carece de valor para un observador aislado del otro. El primero advertirá que la mitad de las veces los fotones atraviesan el primer analizador, en promedio, y que la otra mitad de las veces quedan bloqueados. El segundo observador notará lo mismo con referencia al segundo analizador. En otras palabras, cada sujeto aislado ve sólo una distribución aleatoria de transmisiones y bloqueos.

Supongamos ahora que el primer observador intenta codificar cierta información y enviarla al segundo, cambiando la orientación del primer analizador de polarización. Según sea la orientación de dicho analizador, habrá una correlación estricta o parcial entre los resultados de los sucesos de cada detector. Sin embargo, cada observador notará de nuevo que, en promedio, la mitad de las veces los fotones atraviesan el analizador y la otra mitad de las veces se bloquean. En general, y con independencia de la orientación de los analizadores, cada sujeto observa una distribución aleatoria (y estadísticamente idéntica) de transmisiones y bloqueos. Las correlaciones cuánticas entre los fotones sólo pueden comprobarse mediante la comparación de los datos acumulados en los dos detectores. Por tanto, el intento de explotar las co-



4. BUSQUEDA DE CORRELACIONES entre miembros de pares de fotones. A ella se dedicaron, en la década de 1970, varios investigadores. Los pares de fotones se emitían en transiciones entre estados energéticos de átomos de calcio y de mercurio; cada fotón incidía sobre un analizador de polarización. La mecánica cuántica predice que deben existir finas correlaciones en el paso o bloqueo de los fotones a través de sus analizadores, aun cuando los fotones carezcan de medios aparentes de comunicarse entre sí. Los experimentos confirmaron la mecánica cuántica, pero ofrecían un punto débil: las orientaciones de los dos analizadores se fijaban antes de que se emitieran los fotones. Era posible, pues, que hubiera algún tipo de intercambio de información entre los analizadores.



5. CONMUTACION RAPIDA entre las orientaciones de los analizadores de polarización mientras los fotones estaban en vuelo; ahí reside el punto clave del experimento realizado por Aspect y sus colaboradores [*figura 1*], que concluyó en 1982. Cuando abría un conmutador, el fotón se desviaba hacia un analizador que estaba orientado de una manera; cuando lo cerraba, el fotón viajaba directamente hacia un analizador que estaba orientado de otra manera. El tiempo necesario para que la luz recorriera el intervalo entre los analizadores era mayor que el exigido para conmutar entre las orientaciones; por ello, la elección de la orientación de cada analizador no podía influir sobre la observación realizada en el otro analizador. (Desgraciadamente para su plena definición, la conmutación era periódica, no aleatoria.) El experimento confirmó la mecánica cuántica; veíase que las extrañas implicaciones de la teoría debían aceptarse.

rrelaciones cuánticas para enviar mensajes más deprisa que la luz no puede tener éxito.

En este sentido se da una coexistencia pacífica entre la mecánica cuántica y la teoría de la relatividad, a pesar de la no localidad mecánico-cuántica. Por ese motivo resultaría engañoso (y equivocado) decir que la no localidad en el sentido mecánico-cuántico constituye un retorno a la acción a distancia, como en la teoría gravitacional prerrelativista de Newton. Es fuerte la tentación que nos induce a caracterizar la no localidad mecánico-cuántica como "pasión a distancia"; no se vea en ello ninguna pretensión de proporcionar una explicación de las extrañas correlaciones, sino un afán por hacer hincapié en que no puede recurrirse a las correlaciones para ejercer una influencia controlada más rápida que la requerida por el envío de una señal luminosa.

Otra prueba, conocida por experimento de la elección retardada, que en 1978 propusiera John Archibald Wheeler, entonces en la Universidad de Princeton, revela también la extrañeza del mundo cuántico. El aparato básico del experimento es un interferómetro, en donde un haz de luz puede desdoblarse y recombinarse. Se dirige un pulso de luz proveniente de un láser hacia un desdoblador de haz, orientado de suerte que la mitad de la luz atraviese el desdoblador y la otra mitad se refleje en un ángulo recto respecto de la dirección del pulso incidente. Si se recombina luego la luz de ambas trayectorias, puede detectarse una figura de interferencia que demuestra la calidad ondulatoria de la luz.

Supongamos ahora que el pulso de luz del láser se atenúe tanto que, en cualquier instante, haya sólo un fotón en el interferómetro. Llegados a ese caso cabe plantearse dos cuestiones acerca del fotón. ¿Tomará un camino definido, de manera que el desdoblador del haz lo transmita o refleje, y manifestará, pues, una propiedad corpuscular? ¿U ocurrirá que, en cierto sentido, el fotón se transmitirá y reflejará simultáneamente, interfiriendo consigo mismo y mostrando, por tanto, una propiedad ondulatoria?

Carroll O. Alley, Oleg G. Jakubowicz y William C. Wickes, de la Universidad de Maryland en College Park, e independientemente, T. Hellmuth, H. Walther y Arthur G. Zajonc, de la Universidad de Munich, acaban de dar su respuesta. Ambos grupos han descubierto que un fotón se comporta como una partícula cuando se miden propiedades corpusculares, y se comporta como una onda cuando se miden propiedades ondulatorias. La importante novedad del resultado estribó en el diseño del experimento: la decisión de medir propiedades corpusculares u ondulatorias se tomaba después de que cada fotón hubiera interaccionado con el desdoblador del haz. En consecuencia, el fotón no podía haber sido "informado", en el momento crucial de la interacción con el desdoblador del haz, de si debía comportarse como una partícula y tomar un camino definido, o comportarse como una onda y propagarse a lo largo de ambos caminos.

La longitud de ambos caminos en el interferómetro era de unos 4,3 metros, distancia que un fotón recorre en unos 14,5 nanosegundos. Se trata, obviamente, de un tiempo insuficiente para que un dispositivo mecánico normal conmute la medición de propiedades corpusculares y ondulatorias. Pero la hazaña se logró merced a la célula de Pockels, conmutador capaz de actuar en nueve nanosegundos o menos. La célula de Pockels consta de un cristal que se torna birrefringente cuando se le aplica un voltaje: la luz polarizada según un eje del cristal se propaga a una velocidad distinta de la velocidad de la luz polarizada según la dirección perpendicular. Con una elección acertada del voltaje y de la geometría del sistema, la luz que está polarizada según cierta dirección cuando entra en la célula emergerá polarizada según la dirección perpendicular. La célula de Pockels se introdujo en uno de los dos caminos que el fotón podía tomar tras su interacción con el desdoblador del haz [*véase la figura 6*].

El otro elemento esencial para conmutar entre medidas de propiedades corpusculares y ondulatorias era un trozo de lámina polarizadora. La luz emergente de la célula de Pockels incidía sobre la lámina. Si la célula estaba conectada, la polarización de la luz

provocaba que la lámina polarizante reflejara la luz hacia un fotodetector; con ello se daba respuesta a la pregunta de cuál era el camino y se confirmaban las propiedades corpusculares del fotón. Pero si la célula estaba desconectada, la polarización de la luz provocaba que la lámina polarizante transmitiera la luz; ésta se combinaba entonces con la contribución que llegaba por el otro camino; los efectos de interferencia corroboraban el aspecto ondulatorio del fotón.

Ambos grupos de investigadores han informado de resultados que se hallan en excelente acuerdo con la mecánica cuántica. Su trabajo señala que puede elegirse entre ambas preguntas después de que un fotón haya interaccionado con el desdoblador del haz de un interferómetro.

¿Cómo interpretar los resultados del experimento de la elección retardada? Merece la pena comenzar por rechazar una explicación extravagante que se ha apuntado algunas veces: la mecánica cuántica permite una suerte de "retorno al pasado". La mecánica cuántica no provoca ningún acontecimiento que no haya sucedido antes. En el experimento concreto de la elección retardada, la mecánica cuántica no determina que el fotón tome un camino definido en el instante cero si 12 nanosegundos después se conecta el conmutador de célula de Pockels, ni provoca que el fotón tome los dos caminos, cual una onda, si el conmutador está desconectado.

Más natural es la interpretación que entiende que el estado objetivo del fotón en el interferómetro deja indefinidas muchas propiedades. Si el estado cuántico da una descripción completa del fotón, a nadie sorprenderá entonces esta conclusión, pues en cualquier estado cuántico hay propiedades indefinidas. Pero la conclusión plantea otra pregunta: ¿Cómo y cuándo se define una propiedad indefinida? Wheeler respondería que "ningún fenómeno cuántico elemental es un fenómeno hasta que deviene un fenómeno registrado". En otras palabras, no se produce la transición de la indefinición a la definición mientras no acontezca un "acto irreversible de amplificación", verbigracia, el ennegrecimiento de un grano de emulsión fotográfica. Los estudiosos de los fundamentos de la mecánica cuántica, sin embargo, discrepan de la respuesta de Wheeler. El siguiente experimento muestra por qué la cuestión continúa pendiente.

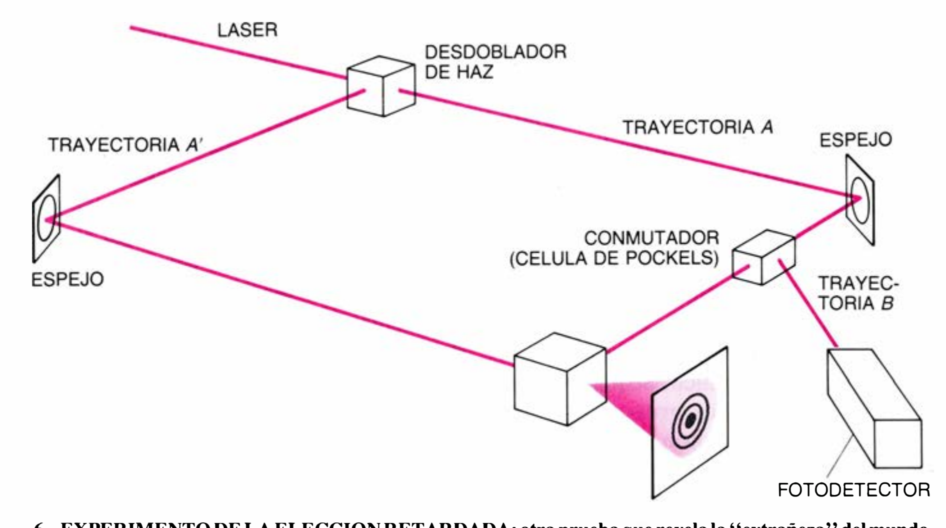
En 1935, Erwin Schrödinger propuso un famoso experimento mental. Un fotón incide sobre un espejo semiplateado. El fotón tiene una probabilidad de 0,5 de atravesar el espejo y otra probabilidad, de 0,5 también, de reflejarse. Si el fotón atraviesa el espejo, se detecta, detección que dispara un dispositivo que rompe una botella de cianuro que, a su vez, mata un gato que hay en una caja. No puede determinarse si el gato está muerto o vivo hasta que se abra la caja.

Nada de paradójico tendría este asunto si el paso del fotón a través del espejo se hallara objetivamente definido, aunque ello se ignorara antes de la observación. Ahora bien, el paso del fotón es objetivamente indefinido; por tanto, la rotura de la botella será objetivamente indefinida y lo será también el estado del gato. En otras palabras, el gato se mantiene suspendido entre la vida y la muerte hasta que lo observamos. La conclusión es paradójica, pero al menos concierne sólo a los resultados de un experimento imaginario.

Más difícil resulta en nuestros días rechazar la naturaleza paradójica de la conclusión, después de que varios grupos de investigadores han logrado algo semejante al experimento imaginario de Schrödinger; citaré a Richard F. Voss y Richard A. Webb, del Centro de Investigación Watson de la IBM en Yorktown Heights, Lawrence D. Jackel de los laboratorios AT&T Bell, Michael H. Devoret, de Berkeley, y Daniel B. Schwartz, de la Universidad estatal de New York en Stony Brook. Su trabajo se ha basado, en parte, en cálculos realizados por Anthony J. Leggett, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, y Sudip Chakravarty, de Stony Brook, entre otros especialistas.

El aparato experimental consta de un anillo superconductor casi cerrado. Dicho anillo se interrumpe con una delgada rodaja de material aislante (unión de Josephson), lo que no impide que una corriente eléctrica pueda circular a lo largo del mismo produciendo un efecto "túnel" a través del aislante. La corriente genera un campo magnético.

La magnitud que importa en el sistema es el flujo magnético que pasa a través del anillo; cuando el campo es uniforme, equivale al área del anillo multiplicada por la componente del campo magnético perpendicular al plano del anillo. Pero si el anillo no se hallara interrumpido, el flujo quedaría atrapado en su interior, aunque el aislante permite que el flujo pase de un valor a otro. Gracias a los modernos magnetómetros, el flujo se mide con una exactitud fantástica. El hecho de que el flujo se deba al movimiento de un número ingente de electrones en el



6. EXPERIMENTO DE LA ELECCION RETARDADA: otra prueba que revela la "extrañeza" del mundo cuántico. Un fotón incide sobre un desdoblador de haz. Ante este dato, caben dos preguntas: ¿Tomará el fotón un camino definido, de suerte que se transmita o refleje en el desdoblador de haz, exhibiendo, por tanto, una propiedad corpuscular? ¿O acaso se transmitirá y reflejará hasta el punto de interferir consigo mismo, exhibiendo una propiedad ondulatoria? Para responder al dilema, se introduce un conmutador en una de las dos trayectorias que el fotón puede tomar después de interaccionar con el desdoblador de haz (*aquí, la trayectoria* A). Si el conmutador está conectado, la luz se desvía hacia un fotodetector (*trayectoria* B); se responde con ello a la pregunta de qué camino se escogió y confirma las propiedades corpusculares del fotón. Si el conmutador está desconectado, el fotón será libre de interferir consigo mismo (*trayectorias* A *y* A') y creará una figura de interferencia, demostrando así las propiedades ondulatorias del mismo. Los resultados del experimento muestran que un fotón se comporta como una onda cuando se miden propiedades ondulatorias y, como una partícula, cuando se miden propiedades corpusculares. Debe señalarse que el conmutador se dispara después de que el fotón ha interaccionado con el desdoblador del haz; significa ello que el fotón no pudo haber sido "informado" antes de si debía comportarse como una partícula y tomar un camino definido o si comportarse como una onda y propagarse simultáneamente en ambas sendas.

anillo superconductor (unos 10^{23}) justifica que pueda hablarse del flujo como de una magnitud macroscópica. Disponemos ya de pruebas sólidas de la posibilidad de preparar estados del anillo superconductor en los que el flujo no presenta ningún valor definido: un aspecto de la mecánica cuántica que sólo estaba asentado para el caso de observables de sistemas microscópicos.

Para entender la demostración experimental de la indefinición, es necesario saber que el anillo posee cierta energía potencial para cada valor del flujo. A nadie se le ocurriría esperar que el flujo a través del anillo cambiara espontáneamente de un valor a otro, dado que hay una barrera de energía potencial que separa los distintos valores adyacentes del flujo. La física clásica prohíbe la transición de uno a otro de tales valores del flujo, a menos que una fuente de energía externa, normalmente térmica, posibilite cruzar la barrera interpuesta. En mecánica cuántica, la barrera puede atravesarse por efecto túnel, sin requerir ninguna fuente de energía externa. Pues bien, los grupos de investigadores antes mencionados han demostrado que el flujo cambia entre dos valores, y que no cabe atribuir ese cambio exclusivamente a los efectos térmicos; el efecto túnel observado debe ser mecánico-cuántico, al menos parcialmente, sobre todo a temperaturas muy bajas. Pero el efecto túnel mecánico-cuántico se basa en la indefinición del flujo, que no puede localizarse de manera acotada en un valor u otro, ni en su entorno.

La demostración experimental de la indefinición cuántica de una variable macroscópica no contradice *ipso facto* la afirmación de Wheeler citada más arriba, pero muestra que la ampliación de un nivel microscópico a otro macroscópico no elimina tampoco, por sí misma, la indefinición mecánico-cuántica. En la frase de Wheeler a propósito de "un acto irreversible de generalización", debe ponerse el énfasis en el adjetivo "irreversible". Las condiciones para la ocurrencia de un proceso irreversible están lejos de hallarse establecidas en la física teórica contemporánea. Algunos estudiosos del tema (entre los que me incluyo) consideran que necesitamos nuevos principios físicos antes de poder comprender la clase peculiar de irreversibilidad que se da cuando un observable indefinido deviene definido en el transcurso de una medición.

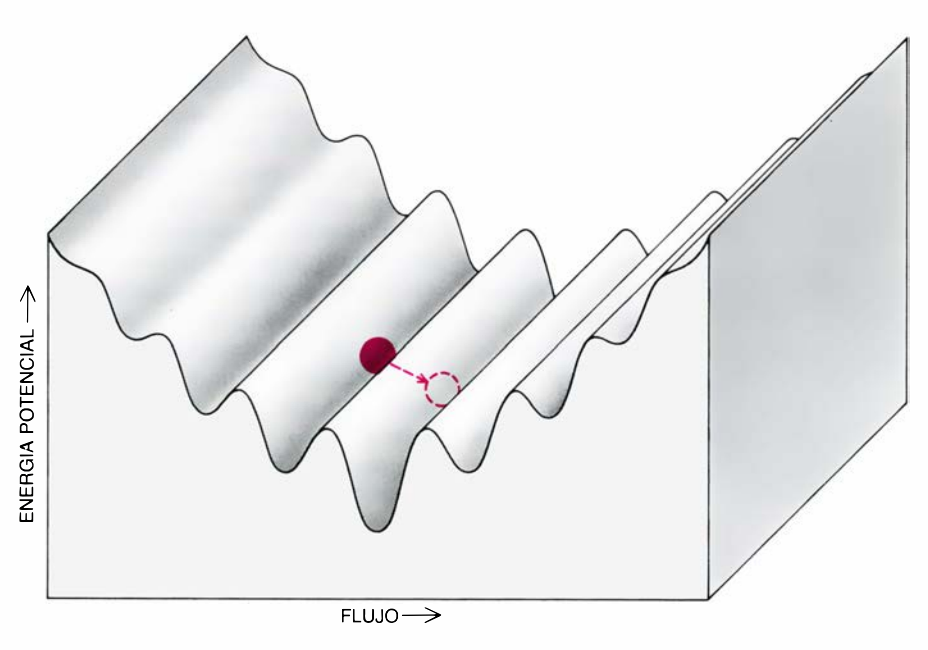
Prosigue la indagación de la "extrañeza" del mundo cuántico. Se han realizado nuevos experimentos y hay otros en marcha. Mencionaremos dos clases de ellos, aunque no tenemos espacio para examinarlos con detalle. En los experimentos de interferometría de neutrones de Helmut Rauch y Anton Zeilinger, del Instituto Atómico de las Universidades Austríacas, Samuel A. Werner, de la Universidad de Missouri en Columbia, y Clifford G. Shull, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y sus colaboradores, la función de ondas de un neutrón se desdobla en una lámina de cristal y se recombina mediante una o dos láminas más. Los efectos de interferencia manifestados en la recombinación demuestran algunas propiedades notables, entre ellas la indefinición de la trayectoria del neutrón a través del interferómetro.

Por último, R. G. Chambers, de la Universidad de Bristol, G. Möllenstedt, de la Universidad de Tübingen, y Akira Tonomura, de la compañía Hitachi, han confirmado por interferometría de electrones el importante efecto Aharonov-Bohm, en el que un electrón "siente" la presencia de un campo magnético que está en una región donde existe una probabilidad cero de encontrar al electrón. Se trata de una demostración desconcertante de una clase de no localidad que difiere de la no localidad exhibida por los pares de fotones correlacionados, aunque guarda una remota relación con ella.



7. UN SISTEMA MACROSCOPICO puede, bajo ciertas circunstancias, existir en un estado en el que una variable macroscópica tiene un valor indefinido; la indefinición no se circunscribe a sistemas microscópicos, verbigracia, el fotón. El sistema que se muestra aquí es un anillo superconductor que no se cierra del todo sobre sí mismo. Una pequeña rodaja de material aislante separa los dos extremos del anillo; por efecto "túnel" a través del aislante, circula una corriente eléctrica a lo largo del anillo. La corriente genera un campo magnético. Si el anillo fuera continuo, el flujo magnético a través del mismo (área del anillo multiplicada por la componente del campo magnético perpendicular al plano del aro) se hallaría obligado a tomar un valor fijo, pero el aislante deja que el flujo varíe de un valor a otro. Para nuestra sorpresa, el flujo no presenta ningún valor definido.

Para un conocimiento cabal de la relación entre ambas clases de no localidad, así como de otras muchas y complicadas cuestiones planteadas por los experimentos que prueban la naturaleza del mundo cuántico, habrá que seguir trabajando.



8. INDEFINICION del sistema, ilustrado de forma esquemática en la figura 7. Cada valor del flujo a través del anillo superconductor tiene cierta energía potencial asociada. No habría razón para esperar que el flujo a través del anillo cambiara espontáneamente de un valor a otro, dado que una barrera de energía potencial separa los valores adyacentes del flujo. Las barreras pueden imaginarse formadas por colinas y, el estado en que se halla el sistema, por una bola situada en un valle entre las colinas. Según la física clásica, una transición entre dos valores separados por una barrera precisa energía exterior (para empujar la bola por encima la colina). Sin embargo, la mecánica cuántica permite el paso de la barrera por efecto túnel, sin ninguna fuente externa de energía. El efecto túnel es una manifestación de la indefinición del flujo.

Ciencia y sociedad

Proposición 65

A partir del primero de este mes de marzo, una "relación mínima" de agentes químicos que son o pudieran resultar cancerígenos para los humanos se encontrará sometida, en California, a un severo control estatal. Así lo regula la proposición 65, aprobada en noviembre de 1986, que declara ilegal la contaminación de cualquier fuente de agua potable con las sustancias recogidas en la relación; los productos del mercado que contengan alguna de dichas sustancias lo advertirán, así lo obliga, en los envases. Podrán exceptuarse aquellos cuyos fabricantes demuestren que no ofrecen "riesgos significativos".

La proposición 65 declara que la relación mínima debe incluir los carcinógenos probables o posibles que hayan sido identificados por dos instituciones autorizadas para ello: el Programa Nacional de Toxicología (NTP) y la Oficina Internacional de Investigación sobre el Cáncer (IARC). Un comité científico asesor del gobernador puede, en caso necesario, ampliar el número de sustancias; todas ellas quedan sometidas a control al cumplirse el primer año de su inclusión en la lista.

La fuerza de esa norma tiene que ver con la impotencia de los ecologistas ante la política federal de control de carcinógenos. En ese sentido, un reciente informe de la Oficina de Evaluación Técnica del Congreso concluía que no se había emprendido ninguna medida sobre 23 de los 61 productos carcinógenos reconocidos por el NTP.

La IARC y el NTP han identificado unos 235 agentes químicos que podrían provocar tumores en el hombre; en su gran mayoría, las pruebas proceden de estudios con animales. Por regla general, los ensayos revelan carcinogenicidad en más de una especie en alguna dosis. Los estudios no precisan, sin embargo, la peligrosidad de esas sustancias para el ser humano.

A todo ello, la industria juzga una mala política crear listas de posibles o probables carcinógenos humanos y someterse a ellas; se incluirán, opinan, agentes de muy distinto potencial lesivo. James R. Fouts, del NTP, señala que su relación de supuestos carcinógenos debía constituir un "un vehículo informativo que estimulara la indagación sobre si esos agentes han de someterse o no a regulación, pero no era ... *la* lista de productos a regular". Para John Higginson, del Hospital Clínico de la Universidad de Georgetown, antiguo director de la IARC, los estudios de esa agencia "nunca pretendieron ser más que una señal de que algo podría constituir un carcinógeno humano".

En primera instancia, el gobernador de California, George Deukmejian, propuso que el control se limitara a los productos cuya carcinogénesis en humanos se hubiera demostrado (que no llegan a la treintena). Sin embargo, su comité asesor decidió, durante 1987, aceptar las pruebas obtenidas en estudios con animales, con lo que se añaden a la lista la mayoría de los agentes identificados por la IARC y el NTP.

Ello no obstante, oponiéndose a los defensores de la proposición 65, el comité recomendó que cualquier compañía que cumpliera los estatutos federales debía considerarse automáticamente en conformidad con la prueba de "riesgo significativo". Al Meyerhoff, del Consejo de Defensa de los Recursos Naturales, afirma que esa recomendación vaciaría de contenido la norma y que la llevaría a los tribunales si el gobernador la aceptara.

La proposición 65 constituye una norma de amplio alcance sobre control de los carcinógenos y sustancias que provocan defectos congénitos o causan esterilidad que no tiene en cuenta los niveles de exposición ni la potencia. Higginson teme que una regulación tan vaga resulte de doble filo y que el efecto de la advertencia llegue a viciarse por su repetición. Algunos funcionarios de sanidad consideran que podría limitarse el riesgo global con mayor eficacia si se vigilara la exposición a sustancias de fuerte potencia cancerígena, sobre todo en los lugares de trabajo.

Los defensores de la proposición 65 insisten en que debe avisarse al público ante cualquier indicio de carcinogénesis y en que la industria debe demostrar la salubridad.

Materia ligera

Acaba de hacerse más real la irrealidad del mundo cuántico. Según la mecánica cuántica, la luz se comporta como si, en ciertas situaciones, estuviera formada por partículas y, en otras, por ondas. Los constituyentes básicos de la materia también exhiben propiedades corpusculares y ondulatorias en función de cómo se interpreten las observaciones. Tres experimentos recientes han ilustrado esa semejanza fundamental de la materia y la luz: haces de átomos se han difractado o reflejado por la luz, de modo parecido a como suelen difractarla o reflejarla cristales materiales, divisores de haces y espejos.

La manipulación de haces atómicos por la luz se apoya en la fuerza de gradiente, que nace de la interacción entre átomos neutros y un gradiente, o cambio en función de la distancia, de la intensidad de un campo eléctrico oscilante. Se logra que la componente del campo eléctrico de un haz de luz láser ejerza esa fuerza, en particular si el rayo se refleja en la misma dirección de procedencia. Los haces que se propagan en sentidos contrarios se interfieren de modo constructivo y configuran una onda luminosa estacionaria: una distribución periódica de crestas y valles de intensidad.

Aprovechando los gradientes del campo eléctrico de esa configuración, muy fuertes y estables, un grupo del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) logró, según informa en *Physical Review A*, dispersar un haz de átomos de sodio que cruzaba en ángulo recto la onda luminosa estacionaria. Controlando cuidadosamente el ángulo de intersección y la morfología y la longitud de onda de la onda lumínica estacionaria, el grupo demostró que el haz podía dispersarse sólo en unas cuantas direcciones.

Valiéndose de un montaje similar, un grupo de la Escuela Normal Superior y del Colegio de Francia, ambos de París, ha observado también la interacción entre un haz de átomos y la luz, muy similar a la que hubiera sufrido de haberse tratado de materia. El grupo explica en *Physical Review Letters* que provocaron el avance de los átomos del haz por los valles de intensidad de una onda luminosa estacionaria igual que los haces atómicos se "canalizan" por entre las filas de átomos de un cristal.

Por último, un equipo que trabaja en el Instituto de Espectroscopía de la Unión Soviética revela, en el *Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters*, que ha podido reflejar un haz de átomos en un "espejo" de luz. El espejo lo formaba un gradiente de campo eléctrico que se extendía justo por detrás de una placa de cuarzo en la que se reflejaba internamente luz de láser. Los científicos descubrieron que el haz atómico se reflejaba cuando rozaba el evanescente campo de la superficie de la placa.

Todos los grupos pretenden ahondar en sus resultados. Los investigadores

soviéticos se disponen a contruir un espejo lumínico cóncavo que focalice un haz atómico con la máxima precisión posible, hasta una mancha de dimensiones comparables con la longitud de onda del haz. El grupo del MIT señala que una onda luminosa estacionaria conserva la fase de las "ondas de materia" del haz atómico cuando se dispersa el haz en dos o más haces. Por recombinación de los haces difractados pueden generarse patrones de interferencia susceptibles de aplicarlos a la medición de corrimientos extremadamente pequeños de sus respectivas fases.

Quizá la sugerencia más seductora corresponda al grupo francés: atrapar átomos en la intersección de tres ondas luminosas estacionarias y perpendiculares. Tal distribución tridimensional pertenecería a un "cristal" de luz, puesto que resulta análogo a la red tridimensional de átomos que constituyen los cristales de materia.

Taquigrafía fractal

A menudo, los fractales, formas geométricas cuyos detalles irregulares se repiten en escalas distintas, presentan una complejidad fantástica. Pese a lo cual, pueden generarse fractales por mera representación de puntos en un plano ateniéndose a dos reglas sencillas, aplicadas de modo estocástico. Se parte de un punto cualquiera. Las reglas podrían obligar, por ejemplo, a que el punto siguiente se encuentre siempre a mitad del camino que se dirige hacia el vértice superior derecho de la página, o a un tercio de la distancia que falta hasta el centro y rotado 40 grados en el sentido de avance de las agujas del reloj; se decide a cara o cruz cuál de las reglas se aplica. En primera instancia la distribución de los puntos parece aleatoria pero, al cabo de centenares de decisiones, emerge una forma característica, un fractal.

Michael F. Barnsley y Alan D. Sloan, del Instituto de Tecnología de Georgia, afirman que, disponiéndose de suficientes reglas y de un ordenador, no sólo pueden generarse curiosidades fractales, sino también imágenes de fenómenos naturales. Ellos han redactado algoritmos que, a partir de reglas, producen imágenes de bosques de pinos, estelas de submarinos sumergidos, rostros humanos y otros muchos objetos. El principal beneficio de su técnica, afirman, es la capacidad de representar imágenes complejas en taquigrafía electrónica: guardar las reglas, en vez de la versión digital completa.

En una memoria de 2000 bytes, dice Barnsley, pueden almacenarse las reglas precisas para crear una imagen de un bosque de pinos que ocupe un millón de píxeles (elementos de imagen); la imagen ocuparía tres millones de bytes. Tal compresión, sostiene el autor, permite almacenar en la memoria de los ordenadores, y transmitir por cable o enlaces de radio, más imágenes.

La gracia está en dar con las reglas, reconoce Barnsley. Se ha automatizado ya el proceso para imágenes en blanco y negro de objetos manifiestamente parecidos a fractales: nubes, helechos y montañas. La determinación de las reglas que generan imágenes más complejas, como un rostro humano en color, sigue constituyendo una tarea difícil y lenta. Debe primero subdividirse la imagen en componentes dotados de cualidades fractales e idear a continuación un conjunto de reglas distinto para cada componente. Según Barnsley, si se prosiguen las investigaciones y se desarrolla un soporte físico especializado en ello, podría automatizarse el proceso de redacción de reglas para cualquier tipo de imágenes.

Barnsley afirma que esa investigación podría aprovecharse de lo que denomina "industrias clásicas de grafismo informático", como son el diseño asistido por ordenador, la simulación de vuelo y los efectos especiales cinemáticos. La Oficina de Investigaciones Avanzadas del Departamento norteamericano de Defensa, que financia esos trabajos, se interesa más por el reconocimiento automático de objetivos. Espera así mejorar, por ejemplo, la capacidad de detección, desde satélites, de las turbulencias superficiales que generan los submarinos; las versiones modernas de esos navíos generan mucha menos turbulencia que sus predecesores. Los algoritmos fractales acelerarían el rastreo que efectúan los satélites en busca de coincidencias entre lo que observan y lo que guardan en memoria. Asimismo, los satélites transmitirían más deprisa las imágenes comprimidas para su análisis en tierra.

Darwin en miniatura

Se adivina fácilmente el mecanismo seguido por la selección natural en el desarrollo de pulgares oponibles o de pelajes de gran espesor. Más difícil resulta probar los efectos de la selección darwiniana en una escala fina: demostrar que la secuencia química de una proteína o un gen representan una adaptación evolutiva de un organismo a un ambiente o a un modo de vida. Basándose en las especializaciones digestivas del mono langur, Caro-Beth



BOSQUE FRACTAL, basado en una fotografía de la Selva Negra alemana, que generaron por ordenador Michael F. Barnsley, Arnaud E. Jacquin, François J. Malassenet, Laurie B. Reuter y Alan D. Sloan, de la Georgia Institute of Technology Research Corporation

Stewart y Allan C. Wilson, de la Universidad de California en Berkeley, y James W. Schilling, de California Biotechnology, Inc., acaban de presentar una elegante descripción del cambio adaptativo sufrido por una molécula.

Se enfrentaban al reto de identificar, entre los numerosos cambios moleculares que parecen provocados por la "deriva neutra", aquellas otras modificaciones que resultan atribuibles a la evolución adaptativa. Comparando las secuencias que presenta un mismo gen, o una proteína, en diversas especies, suele revelarse un ritmo común de cambio en todas las especies y en cada intervalo de tiempo geológico (que difiere considerablemente del ritmo que cabe esperar cuando los cambios son reflejo de presiones selectivas). Para muchos investigadores, esa constancia indica que la mayoría de cambios de secuencia son neutros: ni ayudan ni dañan al organismo y se fijan por azar.

En una contribución a *Nature*, el grupo de California informa que, en los monos langur, la enzima lisozima ha evolucionado ajustándose a una pauta decididamente incoherente con la deriva neutra. En la mayoría de los mamíferos, esa enzima se encuentra en las lágrimas, la saliva y los glóbulos blancos, donde colabora en la lucha contra las invasiones bacterianas degradando la pared celular de los microorganismos. Los rumiantes, vacas y cabras, por ejemplo, hacen otro uso de la lisozima: la explotan en el aprovechamiento de su dieta, que es vegetariana. Su característico "pre-estómago" sirve de cámara de fermentación donde las bacterias digieren la celulosa; en el estómago genuino se digieren las propias bacterias por mediación de la lisozima. Esas mismas especializaciones digestivas aparecieron, independientemente, en los monos colobos, que se alimentan de hojas, entre ellos el langur.

Determinaron la secuencia aminoacídica de la lisozima del langur y la compararon con la que presentaba la enzima del babuino, el hombre y otros animales, vacas incluidas. De haberse producido una evolución impulsada tan sólo por la deriva neutra, la lisozima de cualquiera de ellos se habría apartado, a un ritmo constante, de la de los demás. Por ejemplo, la del langur y la del babuino se habrían modificado en igual proporción desde que compartieron un antecesor común con los humanos; a su vez, las tres secuencias primates se apartarían lo mismo de la secuencia de la vaca. Sin embargo, comparándola con la secuencia humana, la lisozima del langur ha evolucionado con velocidad doble que la del babuino. Y lo que es más importante aún, la mitad de las posiciones aminoacídicas que se han modificado han incrementado su semejanza con la lisozima de la vaca.

Del conjunto de los resultados, escriben los investigadores, podría deducirse que "un 50 por ciento de la evolución de la lisozima gástrica del langur ha estado impulsado por selección darwiniana positiva". Las presiones selectivas probablemente surgieran al asumir la lisozima en los langures un papel digestivo análogo al que desempeña esa enzima en la vaca. Stewart y Wilson también han estudiado la trascendencia de esos cambios convergentes de la secuencia. En el *Cold Spring Harbor Symposium* de 1987 sugirieron que los aminoácidos comunes en el langur y la vaca quizá faciliten la actuación de la enzima en el ácido fluido gástrico y aumenten su resistencia al ataque de los productos de fermentación y de las enzimas digestivas.

Vuelo a ciegas

En los Estados Unidos, donde el SIDA se ha cobrado ya 30.000 vidas, más de una docena de laboratorios privados y públicos están empeñados en la búsqueda de vacunas. La oficina estadounidense de control de alimentos y fármacos (FDA) ha aprobado los ensayos clínicos de dos de ellas, habiéndola recibido ya más de dos docenas de personas. Están a punto de comenzar en el Zaire estudios de amplio alcance en los que se ensayarán varios centenares de vacunas; en ese país, Daniel Zagury, de la Universidad de París, realizó en humanos las primeras pruebas de una vacuna contra el SIDA. Los avances parecen extraordinarios, pues el virus de la inmunodeficiencia humana (HIV) se descubrió hace sólo cuatro años.

Sin embargo, en un congreso reciente sobre vacunas del SIDA celebrado en Washington, a los científicos les pareció la situación preocupante. Los trabajos de obtención de una vacuna contra el SIDA se ven obstaculizados por la inexistencia de métodos para determinar si el producto ejerce su acción tras administrarlo a humanos. Sólo padecen SIDA las personas; puede inocularse el virus en chimpancés, pero hasta la fecha ninguno de los expuestos ha desarrollado el mal. Sin un modelo animal adecuado, nadie puede aventurar si resultarán eficaces las vacunas de inminente aparición.

Existen suficientes puntos oscuros en la infección por HIV para desbaratar cualquier especulación optimista. La variabilidad entre cepas y la elevada tasa de mutación del HIV hacen del virus un objetivo especialmente escurridizo. No se ha desarrollado aún ninguna vacuna contra retrovirus humanos (entre los que se cuenta el HIV) y se ignora cuál de los sistemas defensivos inmunológcos debe activarse para impedir la virulencia de ese agente.

Quizá los ensayos clínicos aclaren alguna de esas zonas de sombra. Pero varios indicios dejan entrever que el ensayo clínico podría constituir el aspecto más problemático del desarrollo de la vacuna. No preocupa la seguridad, pues la mayoría de las vacunas sólo contienen porciones del HIV y, por consiguiente, no podrían transmitir la enfermedad de la que deben proteger; sin embargo, esos ensayos constituirían las primeras pruebas de una vacuna que se realicen sin datos previos sobre su eficacia.

Los ensayos más fiables sobre la posible actuación, en humanos, de esas vacunas experimentales son los realizados con chimpancés. En el mejor de los casos, los datos resultan ambiguos. Por regla general, los chimpancés que han recibido la vacuna desarrollan anticuerpos que desarman al virus en pruebas *in vitro*; pero, cuando a los monos se les inyecta el HIV, siguen contrayendo la infección. La urgencia, cada vez más apremiante, de encontrar un modelo ha obligado a la comunidad científica a agudizar el entendimiento. Algunos investigadores consideran que podría manipularse ratones por ingeniería genética para que resulten vulnerables al SIDA. Otros buscan las claves de los mecanismos inmunológicos en análogos del HIV, como el virus de inmunodeficiencia, de origen simio, o el virus de la leucemia felina.

Entretanto, en la FDA se están apilando las solicitudes de permisos para realizar ensayos de vacunas experimentales en humanos, cuya evaluación no puede esperar a que se disponga de un modelo animal ideal. En el caso de los ensayos clínicos de la primera fase, diseñados para determinar, a diversas dosis, la seguridad y la inmunogenicidad de la vacuna (el grado en que desencadenan la respuesta inmunológica), las cuestiones planteadas son inmediatas: ¿En quién hay que ensayar primero la vacuna? ¿Qué criterios deben establecerse respecto de las prácticas sexuales de los voluntarios? ¿Cómo proteger a los voluntarios del estigma que supone resultar HIV-seropositivo (dar positivo en los análisis de anticuerpos contra el virus del SIDA)?

El primer precedente de esas decisiones se estableció en agosto de 1987,

cuando se aprobó el ensayo clínico de la vacuna que ha desarrollado MicroGeneSys, Inc., de West Haven, Connecticut. En las pruebas, que realiza el Instituto Nacional de la Alergia y Enfermedades Infecciosas (NIAID), sólo participarán hombres HIV-seronegativos de un grupo de bajo riesgo: 678 homosexuales y tres heterosexuales. Se considera que los voluntarios están en "bajo riesgo" si no han quedado expuestos al HIV durante los tres meses anteriores. Se les indica que no deben realizar prácticas sexuales que puedan propagar la infección durante el curso de los ensayos, que duran entre seis meses y un año. Aunque puede distinguirse el perfil inmunológico de un individuo infectado del que corresponde a otro que haya recibido la vacuna, los participantes dispondrán de documentos que acrediten el origen de su estado HIV-seropositivo. En la Facultad de Medicina de la Universidad de Washington se seguirá este año un protocolo similar con una vacuna desarrollada por Oncogen, de Seattle.

Ya en esa primera fase el NIAID ha tenido problemas en el reclutamiento de voluntarios. A mediados de diciembre, después de tres meses de estarlo anunciando a toda la nación y de realizar varios centenares de informes, el instituto no había encontrado ni siquiera una treintena de participantes. No sorprende la escasez: a diferencia del que participa en pruebas de medicamentos o vacunas de eficacia demostrable, el voluntario de la vacuna contra el SIDA no tiene nada que ganar y mucho que perder. "Desde el primer momento tuvimos conciencia de que no resultaba ético pedir a gente sana que participara en las pruebas salvo que lo hicieran por servicio a la humanidad o porque se creyeran Rambos", afirma David T. Karzon, profesor de pediatría de la Facultad de Medicina de la Universidad Vanderbilt, que ha trabajado en el centro federal de evaluación de vacunas de esa institución. "No conocemos ningún efecto benéfico."

La situación cambiaría en el caso de que los resultados de la primera fase resultaran esperanzadores. Sólo se precisaría otro centenar de personas en la segunda, en la que se ampliarán los estudios de inmunogenicidad y dosificación.

En los estudios de tercera fase se realizan millares de vacunaciones y se tarda varios años en concluirlos. ¿Cómo reunir miles de participantes, si no hay manera de juntar 80? Cuando empiecen a estudiarse otras vacunas se agotará todavía más la reserva de reclutas. A la larga habrá que extender las pruebas a la población heterosexual, y en ese punto resultará muy difícil satisfacer los criterios estadísticos, puesto que la incidencia de la infección y la enfermedad en ese grupo es extraordinariamente baja. El escrutinio sistemático de algunas cohortes, como los reclutas militares y las mujeres de hemofílicos, ha sacado a la luz subpoblaciones con tasas de infección insólitamente altas, que podrían utilizarse en estudios de eficacia.

También supondrá un obstáculo en los ensayos de tercera fase el período de latencia del HIV, que todavía no se ha determinado. Si un vacunado se infecta y no desarrolla la enfermedad, podría creerse que la vacuna brinda protección. Pero se sabe que individuos no vacunados que han portado, latente, años enteros el virus de la inmunodeficiencia han caído víctimas del SIDA de modo súbito e inexplicable. ¿Cuánto debe esperarse para juzgar que la vacunación ha tenido éxito? ¿Debe considerarse un fracaso la mera infección? A falta de un modelo animal, el hombre va a tener que hacer de conejillo de indias.

Plasticidad sináptica

Cambios en el número, tipo y función de las conexiones del sistema nervioso son fundamentales para la adaptación de los organismos superiores a distintas variaciones, tanto ambientales como internas

Manuel Nieto Sampedro

Empleado en otro tiempo para designar la susceptibilidad del comportamiento de ser modificado, el término *plasticidad* remite hoy a la capacidad del sistema nervioso para cambiar en respuesta a presiones ambientales, lesiones o modificaciones en el estado interno del organismo. Para poder mediar las diversas respuestas adaptativas, las redes de circuitos nerviosos permanecen modificables (plásticas) durante la vida entera del organismo. La plasticidad del sistema nervioso central (SNC) de los mamíferos y, en mayor grado, del hombre es la responsable de la enorme flexibilidad adaptativa de estos seres. ¿Cuáles son las bases celulares y moleculares de esa plasticidad?

El SNC está formado por dos tipos principales de células: las células nerviosas, o neuronas propiamente dichas, y las células gliales. Las neuronas se han especializado en la recepción y transmisión rápida de mensajes, tanto internos como procedentes del medio ambiente. Su morfología, al igual que su función, está muy especializada. Las neuronas presentan un cuerpo celular bastante pequeño, si lo comparamos con la superficie ocupada por sus múltiples prolongaciones. La mayoría de estas prolongaciones se encargan de recibir mensajes: son las dendritas. Otra estructura, generalmente mucho más larga, es la responsable de la transmisión de mensajes: el axón. En el hombre, por ejemplo, la longitud de algunos de estos axones o fibras nerviosas es superior a un metro.

El cerebro humano contiene más de 10.000 millones de neuronas; el cerebelo, de 10.000 a 100.000 millones. El lugar donde el axón transmite el mensaje o impulso nervioso a otra neurona se denomina sinapsis; también se llama contacto sináptico. Las neuronas de Purkinje del cerebelo, implicadas en el control fino del movimiento, pueden recibir hasta 200.000 sinapsis; por mor de comparación, una neurona típica del SNC suele recibir decenas de miles de contactos. Las conexiones entre neuronas dan lugar a circuitos neuronales. La plasticidad del sistema nervioso es, en gran medida, la capacidad de modificación del tipo, forma y función de las sinapsis que conectan los circuitos neurales. Y ocurre así que la plasticidad sináptica constituye el soporte de procesos tan dispares como el aprendizaje y la memoria, la adaptación a situaciones fisiológicas nuevas como el embarazo y la sed, así como de la recuperación del sistema nervioso después de sufrir lesiones.

La plasticidad neuronal es máxima durante el desarrollo y se expresa durante la madurez en respuesta a perturbaciones externas o internas, por ejemplo, cambios en niveles hormonales, alteraciones del medio ambiente, lesiones u otras. En el resto del artículo pasaré revista al estado de nuestro conocimiento sobre la plasticidad sináptica en el sistema nervioso de los mamíferos adultos, los tipos de estímulo que evocan esta plasticidad, los procesos moleculares que la median y la posibilidad de utilizar esta información para intervenir en la reparación del sistema nervioso central después de una lesión.

Los cambios en número y clase de sinapsis están mediados por un proceso general denominado renovación de sinapsis (o *turnover*). La renovación de una población de sinapsis es el proceso de ruptura de una serie de contactos sinápticos y su substitución por otros nuevos. Dentro de esta población, puede suceder que desaparezca una sinapsis y no se la substituya, o que se establezca una sinapsis nueva allí donde no existía antes ninguna. En su caso más general, el proceso de renovación consta de cuatro etapas: desconexión de las sinapsis, iniciación y crecimiento de nuevos terminales axónicos, formación de nuevos contactos sinápticos y, por último, maduración de las nuevas sinapsis. (Por tal maduración hay que entender la aparición de vesículas sinápticas y las llamadas densidades presinápticas y postsinápticas.)

Los terminales presinápticos que participan en la renovación de sinapsis nacen de axones preexistentes en un proceso de formación de brotes axónicos (*axon sprouting*). Según el punto axónico de origen del brote, se distingue entre brotes terminales o ultraterminales y brotes colaterales. Los brotes terminales o ultraterminales son prolongaciones del terminal presináptico; los colaterales surgen como una nueva rama del axón, independiente de otras terminaciones nerviosas que hubiera ya. Cuando el brote colateral se origina en un nódulo de Ranvier de un axón mielinizado, recibe la denominación de brote nodal; regenerativo, si el brote se origina como continuación renovada del muñón de un axón seccionado. La formación de brotes axónicos no tiene nada que ver con la formación subsecuente de nuevas sinapsis. La verdad es que, en el SNC, los brotes suelen degenerar y no llegan a establecer sinapsis. Así pues, la expresión brote axónico designa sólo un tipo de respuesta de crecimiento, que puede o no ser el primer paso para la formación de nuevas sinapsis.

Un caso particular de renovación de sinapsis lo encontramos en el proceso de sinaptogénesis reactiva, que consiste en la formación de contactos en respuesta a un estímulo que no entra en el programa de desarrollo normal del organismo. Se trata de un proceso que tiene gran importancia en la respuesta del sistema nervioso a las lesiones.

Durante el desarrollo, las sinapsis pasan por ciclos de formación y regresión. Este fenómeno fue claramente descrito por Clark C. Speidel, quien los observó en las terminaciones

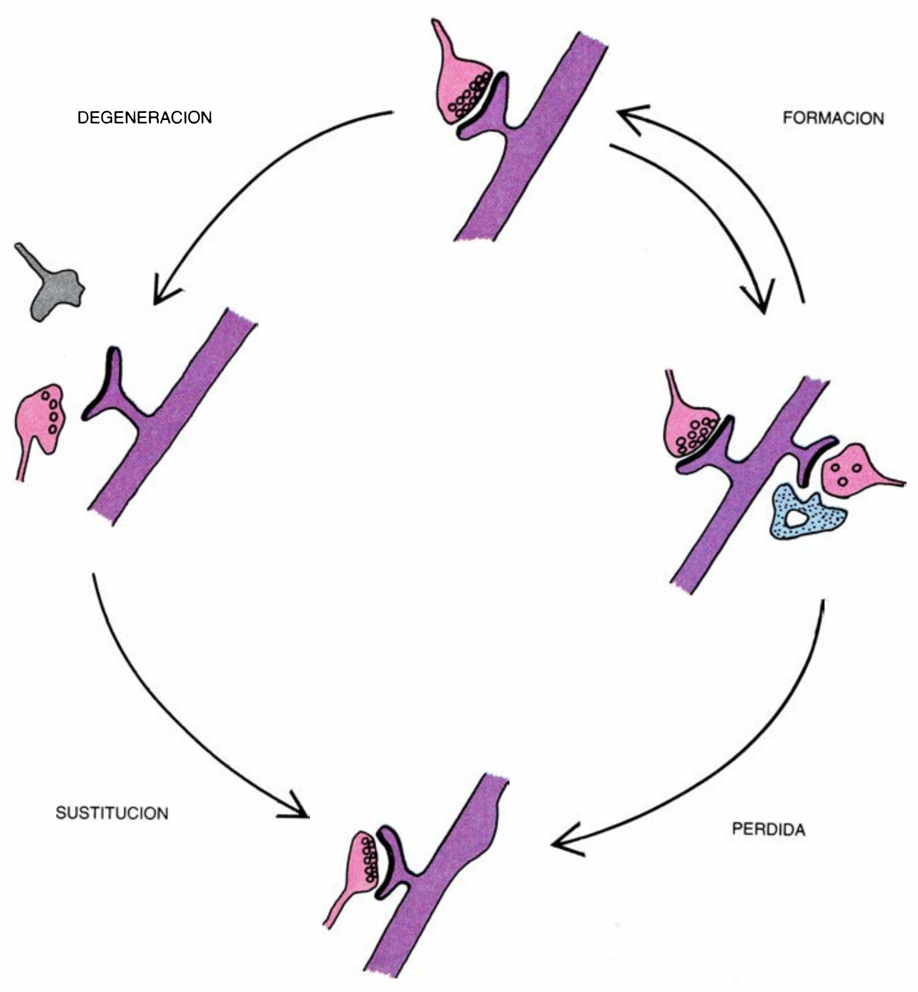
nerviosas del renacuajo vivo. En una misma arborización sensorial, Speidel halló terminales en reposo, otros en fase de crecimiento y unos terceros en clara regresión. En condiciones ambientales, algunos terminales en reposo se transformaban, transcurrido cierto tiempo, en conos de crecimiento; otros proseguían su desarrollo o bien se estabilizaban, y otros, por fin, degeneraban. En definitiva, Speidel descubrió que, en un sistema nervioso en desarrollo, las estructuras eran dinámicas. Otros grupos de investigadores y, más recientemente, el autor de este artículo y Carl W. Cotman, han propuesto que este dinamismo o plasticidad prosigue, a niveles de expresión más reducidos, durante la vida entera de todos los vertebrados. Esta idea fue propuesta ya a principios de siglo por los histólogos españoles Santiago Ramón y Cajal y Jorge Francisco Tello. Sin embargo, la comprobación experimental ha sido lenta y, aunque se dispone ya de un número suficiente de pruebas para establecer la existencia del fenómeno, dista de ser completa.

No es fácil demostrar, por vía experimental, la renovación espontánea de sinapsis en el SNC de mamíferos adultos. A diferencia de la cola del renacuajo utilizada por Speidel, el SNC de los mamíferos adultos no es accesible *in vivo* a la observación microscópica repetida. La observación de estructuras que implican la renovación de sinapsis —así, los axones en proceso de degeneración junto con otros en proceso de crecimiento, o estructuras postsinápticas desocupadas— se produce sobre imágenes simultáneas de un mismo animal. Al no darse consecutivamente en el tiempo, tales observaciones constituyen una mera prueba circunstancial de la existencia de la renovación sináptica. Los registros electrofisiológicos pueden ayudarnos, en determinadas circunstancias, a detectar esa renovación en el animal vivo. Sin embargo, la multiplicidad de explicaciones alternativas que del fenómeno observado pueden darse dificultan una conclusión convincente. Para establecer la realidad de la renovación sináptica hay que apoyarse en estudios concomitantes de tipo anatómico y electrofisiológico.

Ejemplo especialmente claro de renovación reversible de sinapsis es el aportado por Glenn Hatton y colaboradores, de la Universidad de Michigan, quienes trabajaban con los axones secretorios de la neurohipófisis. Estos axones se originan en las neuronas magnocelulares del núcleo supraóptico del hipotálamo y terminan en los espacios que rodean a los capilares fenestrados, donde descargan pequeños péptidos hormonales (sus productos de secreción). Dos de estos péptidos —la oxitocina y la vasopresina— tienen bien caracterizadas sus acciones respectivas: controlar la retención de agua y la contracción de la musculatura lisa.

En una rata hembra que esté bien hidratada y no se halle preñada o en período de lactancia, las neuronas del núcleo supraóptico se encuentran separadas unas de otras por células gliales. De forma similar, sus terminaciones axónicas están aisladas de los capilares por los pituicitos, células astrogliales especializadas que rodean completamente estos terminales. La privación de agua por cuatro o más horas, la lactancia y los estadios avanzados del embarazo o el parto inician la siguiente cascada de acontecimientos: retraimiento de los procesos gliales y, en consecuencia, aparición de contactos tanto entre cuerpos celulares como entre dendritas de neuronas vecinas (lo que permite el acoplamiento electrotónico entre estas células); aparición de contactos sinápticos entre neuronas magnocelulares adyacentes; retracción de los pituicitos, facilitando así el acceso de los terminales axónicos al espacio perivascular; sustitución de la actividad eléctrica irregular y lenta de las neuronas supraópticas por un ritmo rápido de actividad continua con descargas ocasionales de alta frecuencia, y, por último, aparición de síntesis de proteínas, en particular de las hormonas vasopresina y oxitocina y sus precursores. Estos cambios ocurren en paralelo, concomitantes con la respuesta fisiológica apropiada —retención de agua en los riñones o aumento de la presión mamaria— y son reversibles.

Ante las dificultades técnicas para demostrar la renovación espontánea de las sinapsis, las investigaciones se han centrado en los sistemas en los que dicha renovación se inicia mediante un estímulo experimental, para analizar luego las respuestas desenca-



1. RENOVACION ("TURNOVER") de la sinapsis. Se trata de un proceso que implica la formación y pérdida de contactos sinápticos. En la formación reversible de sinapsis intervienen los astrocitos (*azul*), que
pérdida de contactos sinápticos. En la formación reversible de sinapsis intervienen los astrocitos (*azul*), que
mediante la interposición de finos procesos o prolongaciones protoplasmáticas. La pérdida de sinapsis puede ocurrir también por degeneración del botón presináptico (*gris*) y sustitución por un nuevo terminal.

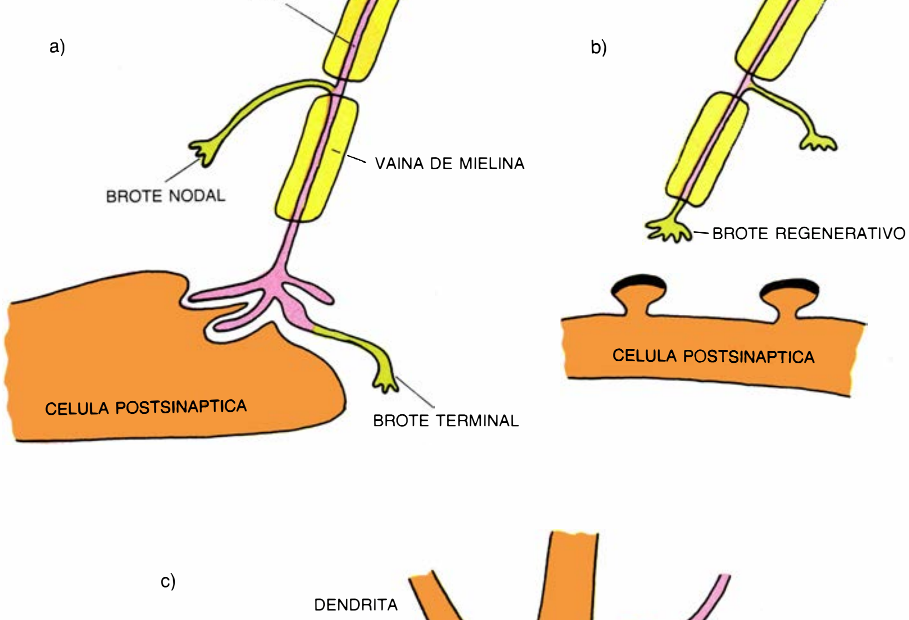
denadas. El estímulo experimental que produce las respuestas más intensas, reproducibles y mejor estudiadas son las lesiones. A este respecto, la estructura del SNC denominada giro dentado del hipocampo (o *fascia dentata*) ha recibido especial atención. Aunque forma parte de la corteza cerebral, el hipocampo presenta una anatomía bastante más sencilla que la propia corteza en general. Se trata de una formación bilateral donde predominan dos tipos de neuronas: piramidales, en el hipocampo propiamente dicho, y granulares, en el giro dentado.

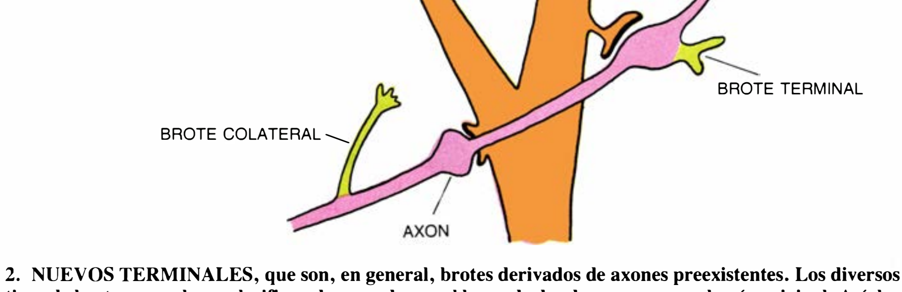
El aferente extrínseco más abundante del hipocampo procede de la corteza entorrinal; son fibras que conducen impulsos excitatorios y terminan en las dendritas de las neuronas granulares (la denominada capa molecular), aproximadamente en sus dos tercios más externos. Aunque la proyección es bilateral, sólo un pequeño número de aferentes procede de la corteza del lado opuesto (contralateral). Entre los aferentes extrínsecos, el segundo en importancia corresponde a las fibras colinérgicas procedentes del septum. En el giro dentado, la mayor parte de estas fibras termina en una capa situada inmediatamente sobre los cuerpos de las neuronas granulares, pero una débil proyección acaba en la misma capa que los aferentes entorrinales. El tercio del árbol dendrítico de las células granulares más cercano al soma está ocupado por terminales procedentes de las células piramidales, o sea, de aferentes asociativos e intrínsecos al hipocampo. Los axones de las células granulares terminan, a su vez, en las células piramidales y forman, en conjunto, un circuito cerrado.

La destrucción unilateral de la corteza entorrinal conduce a la pérdida del 90 por ciento de las sinapsis en los dos tercios de la capa molecular del giro dentado del mismo lado que la lesión (ipsilateral). Esa pérdida masiva del aferente (deaferentación) constituye también la señal que inicia la restitución de las sinapsis y conduce a la reorganización de los circuitos del hipocampo. Las nuevas sinapsis se forman a partir de brotes de los axones no afectados por la lesión. Así, la proyección entorrinal procedente del lado opuesto al lesionado (contralateral) y las fibras procedentes del septum, ambas inicialmente débiles en la zona deaferentada, aumentan hasta ocupar aproximadamente toda la mitad externa de la capa molecular. Los axones procedentes de las células piramidales del hipocampo, que inicialmente ocupaban sólo el tercio interno de la capa molecular, se expanden hasta cubrir casi la mitad de ésta. El proceso de sinaptogénesis reactiva comienza a los tres o cuatro días después de la lesión, cuando aparecen los primeros brotes axónicos, alcanza un máximo entre los 15 y 20 días y no concluye hasta dos o tres meses más tarde.

El proceso no se restringe a las zonas directamente interesadas por la lesión. Así, entre dos y 10 días después de producida una lesión unilateral de la corteza entorrinal, el 22 por ciento de las sinapsis existentes en la capa molecular interna de la *fascia dentata* ipsilateral experimentan un ciclo de renovación. Un fenómeno similar, aunque mucho más lento, se observa en la zona análoga del hemisferio cerebral opuesto. Ninguna de estas áreas del hipocampo recibe proyecciones de la corteza entorrinal y los ciclos de renovación sináptica parecen ser una respuesta compensatoria de las neuronas granulares a la pérdida de aferentes en la parte externa de su árbol dendrítico. El fenómeno trasciende las sinapsis de las neuronas afectadas: las sinapsis formadas por los axones de las células granulares con las neuronas piramidales del hipocampo experimentan también un pronunciado ciclo de renovación en respuesta a la lesión.

Tan sólo otra formación del SNC, el núcleo rojo mesencefálico, ha sido objeto de parecida investigación. Se han ocupado del mismo Nakaakira Tsukahara y colaboradores, de la Universidad de Osaka. El núcleo rojo está implicado en el control de los movimientos voluntarios y reflejos, y con este fin se proyecta hasta la médula espinal. Las neuronas magnocelulares del núcleo rojo, de notable tamaño, reciben dos tipos de aferentes muy distintos. Los aferentes de la corteza motosensorial terminan en la porción distal del árbol dendrítico; los provenientes del cerebelo acaban en el cuerpo celular. Esas características convierten a las neuronas magnocelulares en un sujeto ideal para el estudio de la plasticidad





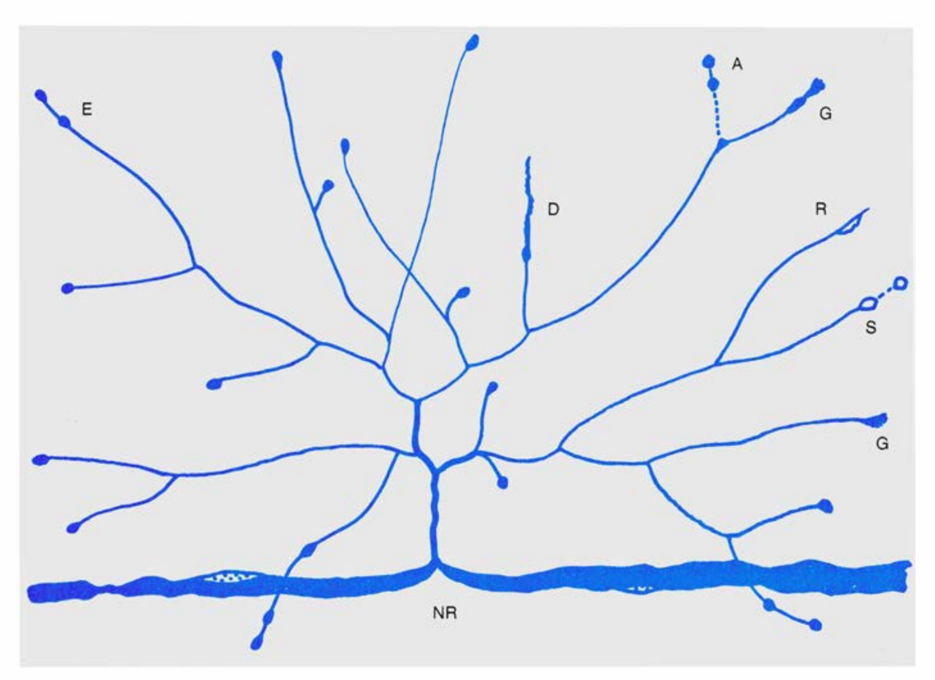
2. NUEVOS TERMINALES, que son, en general, brotes derivados de axones preexistentes. Los diversos tipos de brotes axonales se clasifican de acuerdo con el lugar de donde arrancan en el axón original. Así, los brotes nodales se originan en los nodos de Ranvier de las fibras mielinizadas. En el caso más general, estos brotes se denominan colaterales, sobre todo si el axón originario carece de mielina. Los brotes terminales se originan en el botón terminal. La figura ilustra su apariencia en dos casos: en la unión neuromuscular (*a*) y en una sinapsis típica del SNC formada entre un axón y una espina dendrítica (*c*). Si un axón queda seccionado por una lesión, el muñón terminal da lugar a brotes regenerativos (*b*), esenciales en la recuperación final.

nerviosa, mediante el recurso paralelo de técnicas anatómicas y electrofisiológicas.

En el gato, los aferentes corticales forman nuevas conexiones, esta vez en el soma y en la parte de las dendritas más próximas al soma. Y lo hacen en los casos siguientes: después de la destrucción de los aferentes al núcleo rojo provenientes del cerebelo; después de invertir la inervación de los músculos flexor y extensor de una de las garras del animal, y, en tercer lugar, como consecuencia del condicionamiento clásico de la posición de la garra.

En el primer caso —después de la destrucción de los aferentes—, la sustitución de sinapsis ocurre en respuesta a una intervención quirúrgica directa en el cerebro del gato. Esta intervención, la destrucción de uno de los aferentes del núcleo rojo, provoca la formación de nuevos brotes axónicos que dan lugar a las nuevas sinapsis en sustitución de las perdidas por culpa de la lesión. En los casos segundo y tercero —inversión de la inervación y condicionamiento de la posición de la garra—, se establecen nuevas sinapsis en ausencia de intervención quirúrgica en el cerebro del animal. En el caso de la inversión de la inervación de la garra del gato, el felino presenta al comienzo un comportamiento inadecuado: extiende la garra cuando debiera contraerla y viceversa. Con el tiempo, el animal corrige su conducta y realiza los movimientos idóneos, a pesar de que la inervación de los músculos sigue siendo la opuesta a la normal. Cuando ello ocurre, se observa que el curso temporal de la aparición de movimientos correctos en la garra se correlaciona estrechamente con la reorganización de las sinapsis en las células magnocelulares. En resumen, la reorganización sináptica del SNC compensa y corrige defectos periféricos.

Vayamos con el tercer caso: cuando el tratamiento que recibe el animal es el condicionamiento del movimiento de la pata en respuesta a la estimulación eléctrica del núcleo rojo. La estimulación por sí sola no suele provocar respuesta alguna (estímulo condicional); pero se puede conseguir que el gato la interprete como un estímulo nocivo si se empareja con una descarga eléctrica en la pata (estímulo incondicional). La respuesta al estímulo condicional (retirada de la pata) aparece concomitantemente con nuevas sinapsis corticales cercanas al soma de las neuronas del núcleo rojo.



3. TERMINACION SENSORIAL MIELINIZADA, observada en la cola de un renacuajo vivo. Este brote nodal ramificado presenta todos los estadios posibles de los botones terminales. Aunque la mayoría de los terminales están en reposo (*E*), algunos poseen conos de crecimiento típicos de axones en proceso de prolongación (*G*). Por contra, el terminal *R* se está retrayendo y el *D* se encuentra en franca vía de degeneración. Debemos esta observación a Clark Caskey Speidel, de la Universidad de Virginia. *NR* es nodo de Ranvier.

Existen muchas cuestiones relativas a la renovación de las sinapsis en el SNC que la técnica de los trasplantes permite abordar. El trasplante de tejido nervioso en un SNC adulto es, por sí mismo, la prueba más difícil a que puede someterse la plasticidad de dicho SNC. ¿Es éste, en su estadio adulto, capaz de integrar nuevos grupos de neuronas y formar con ellas conexiones funcionales? La respuesta es un *sí* condicional. Hasta la fecha, los trasplantes se han utilizado para una triple finalidad: evaluar los requerimientos de supervivencia de las neuronas del SNC *in situ*, estudiar la capacidad de crecimiento de los axones del SNC y averiguar la capacidad de los brotes axónicos de crecer en la dirección correcta y formar sinapsis específicas con el blanco adecuado. Se ha ensayado también la potencialidad terapéutica de los trasplantes en el SNC, en particular si se han perdido neuronas a consecuencia de neurotoxinas, enfermedades degenerativas o defectos congénitos.

El empleo eficaz de los trasplantes, ya sea como instrumento clínico o de investigación, exige la supervivencia óptima del tejido trasplantado. Cuando se trasplantan las neuronas en una cavidad creada en la sustancia gris del huésped, su supervivencia varía según el tipo de tejido donante. En general, las neuronas corticales sobreviven bien; otras, como las de los núcleos rafe o *septum*, no llegan a tanto, y las del cuerpo estriado no sobreviven en absoluto. La supervivencia y el crecimiento de los trasplantes quedan asegurados cuando el tejido donador se coloca en la cavidad del huésped con un lapso de ocho a 15 días después de crear ese hueco receptor.

¿Cómo explicar este fenómeno? Para la supervivencia de los trasplantes resulta esencial, obvio es recordarlo, el suministro de nutrientes y oxígeno, así como la eliminación de metabolitos tóxicos. O lo que es lo mismo: la supervivencia de los trasplantes depende de su vascularización. Se supuso en un comienzo que el lapso de tiempo entre la creación de la cavidad receptora y la implantación permitía la vascularización de la cavidad y, por tanto, la mejor supervivencia de los trasplantes. Sin embargo, la vascularización, a pesar de su indudable importancia, no explicaba la distinta supervivencia de las diferentes regiones del SNC, ni la existencia de un intervalo óptimo más allá del cual la supervivencia de los trasplantes caía de nuevo.

La respuesta la dio el autor y sus colaboradores en la Universidad de California en Irvine y San Diego. La cavidad receptora del trasplante es, de hecho, una lesión en el tejido huésped, perturbación que induce la producción local de sustancias semejantes a hormonas, los llamados factores neurotróficos, que son esenciales para la supervivencia de las neuronas trasplantadas. Durante el intervalo temporal trans-

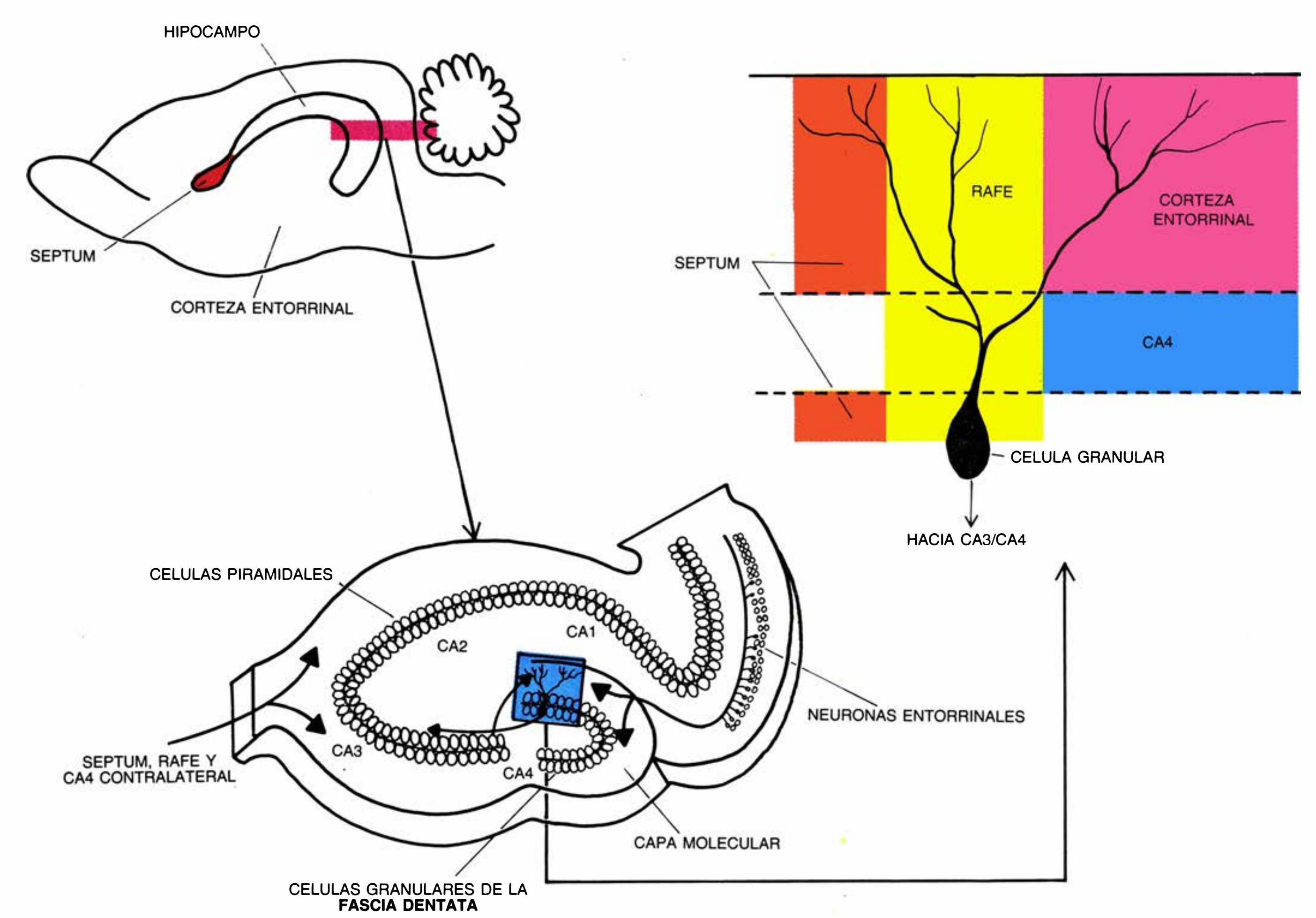
currido entre la creación de la cavidad y la implantación se desarrolla en el hueco una actividad trófica muy elevada. El pico de máxima producción de factores neurotróficos coincide con el intervalo necesario para la supervivencia óptima de trasplantes.

La integración del tejido trasplantado en el tejido huésped requiere la formación de conexiones neuronales recíprocas entre trasplante y huésped. Lo que, a su vez, necesita la elongación de los axones originados tanto en las neuronas del huésped como en las del tejido implantado. Los trasplantes que han tenido más éxito hasta el momento han utilizado SNC embrionario como tejido donante.

Los axones originados en las neuronas embrionarias implantadas crecen y se prolongan, por largas distancias, en el SNC adulto, hasta alcanzar el objetivo propuesto: las neuronas del huésped. (En este contexto, un intervalo espacial de varios milímetros pueden considerarse distancias largas en el cerebro de una rata.) Los axones no se limitan a llegar hasta las células diana, sino que, además, se proyectan con alta especificidad en el lugar correcto del soma o de la arborización dendrítica. Así, los trasplantes de *septum* embrionario envían sus axones a las neuronas granulares del giro dentado; una vez allí, se proyectan sobre la capa inmediata superior del soma y sobre la parte externa del árbol dendrítico, pero dejan vacante la zona intermedia entre estas dos capas. De estas observaciones, realizadas por el autor, se infiere que el SNC del huésped adulto constituye un "terreno abonado" para el crecimiento dirigido de los axones procedentes de neuronas embrionarias transplantadas.

Pero, ¿puede decirse lo mismo de los brotes reactivos o regenerativos procedentes de los axones adultos del huésped? En general, la respuesta es negativa. De manera espontánea, los brotes mielinizados de las neuronas adultas crecen sólo unas cuantas micras y luego degeneran, o forman sinapsis locales. Esta ausencia de crecimiento por largas distancias no obedece a un problema intrínseco de esas neuronas, como lo demuestran los experimentos de Albert Aguayo y colaboradores, del Hospital General de Montreal. Este equipo ha demostrado que, para instar el desarrollo de los axones del SNC, en longitud muy superior a la normal (hasta varios centímetros en el cerebro de rata), basta colocarlos en contacto con un trasplante de nervio periférico mielinizado. Los axones centrales penetran en la vaina de mielina periférica y avanzan largo trecho en el interior de la misma.

Se ha recurrido a trasplantes de este tipo para conectar, en ratas, los dos muñones separados de la médula espinal seccionada, para unir zonas del cerebro con regiones de la médula muy distantes y, más recientemente, para inducir la regeneración de los axones del nervio óptico. Las fibras nerviosas que crecen en estas condiciones con-



4. EL HIPOCAMPO: una de la estructuras corticales cuya anatomía y plasticidad ha sido mejor estudiada. Consta de dos componentes, el hipocampo propiamente dicho y el giro dentado o fascia dentata. En este último predominan las neuronas granulares, en tanto que en el hipocampo lo hacen las células piramidales. Los aferentes extrínsecos más importantes proceden de la corteza entorrinal y del septum. La inervación del giro dentado se muestra a la derecha en detalle. El área cubierta por el árbol dendrítico de las células granulares se denomina capa molecular. Más del 90 por ciento de las sinapsis en los dos tercios de la capa molecular están establecidas por aferentes que proceden de la corteza entorrinal. En el tercio del árbol dendrítico más cercano al soma, la mayoría de los aferentes arrancan de las células piramidales del área CA4. Las fibras septales terminan en una fina capa que yace sobre el cuerpo celular; se observa una proyección más débil en la capa molecular externa. Los escasos aferentes procedentes del rafe se distribuyen homogéneamente en el giro dentado.

ducen impulsos nerviosos normalmente. Sin embargo, cuando estas fibras salen de la vaina de mielina periférica, apenas si penetran en el tejido del sistema nervioso central más allá de unas decenas de micras.

Los trasplantes de tejido nervioso central embrionario se comportan, en lo relativo a facilitar el crecimiento de los axones adultos, de forma muy parecida al nervio periférico. En general, el crecimiento de los axones parece depender de ciertas señales que las neuronas intercambian con su medio ambiente inmediato. Los axones de las neuronas embrionarias puede crecer en el SNC adulto. Los axones adultos, sin embargo, sólo son capaces de progresar en el entorno que les proporcionan los trasplantes de nervio periférico o los de SNC embrionario.

Hasta el momento, los trasplantes de SNC embrionario han mostrado ser eficaces en la restauración de algunos tipos de función. Los déficits de aprendizaje y memoria que aparecen a consecuencia de las lesiones en la sustancia gris cortical o en las fibras nerviosas del haz fimbria-fornix, así como las asociadas con la vejez, pueden restaurarse en parte mediante trasplantes de SNC embrionario. Los trasplantes de neuronas secretoras de hormonas compensan también determinadas deficiencias, ya sean congénitas o inducidas experimentalmente. En el caso de animales de experimentación, los trasplantes de neuronas dopaminérgicas (o incluso de médula adrenal) son capaces de reducir los trastornos motores que ocurren en la vejez o provocados por lesiones que destruyen el núcleo de la substantia nigra. En seres humanos, los trasplantes de médula adrenal y, más recientemente, de substantia nigra embrionaria se han destinado a corregir los síntomas de la enfermedad de Parkinson. En este aspecto, los trasplantes tienen un comportamiento paralelo al de la dopamina o agonistas de la dopamina suministrados exógenamente. No restauran los circuitos iniciales, sino que parecen desempeñar una función neuromoduladora. La profunda recuperación funcional que estos trasplantes producen en algunos casos suministra información esencial sobre los requerimientos estructurales mínimos que aquélla demanda.

Los mecanismos de renovación de las sinapsis que operan en el adulto no parecen diferir, en lo esencial, de los que actuaron ya durante el desarrollo. Diríase que la mayor diferencia estriba en el aumento del número neto de sinapsis que se produce durante el desarrollo y en el predominio del proceso de ruptura y sustitución ("turnover") en la fase adulta.

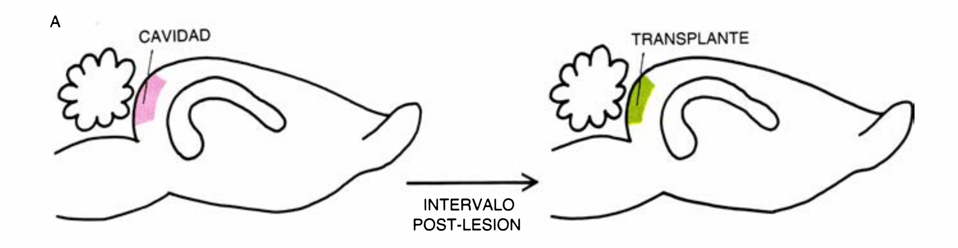
El proceso de ruptura implica la desconexión de la sinapsis. Este paso es análogo al de eliminación de sinapsis que se observa durante el desarrollo. En el adulto hallamos, como mínimo, dos procesos de desconexión: en uno de ellos degeneran los terminales presinápticos; los estadios finales de esta degradación lenta se pueden observar al microscopio. El segundo proceso dura, como máximo, unas cuantas horas; esta desconexión es reversible y no degeneran los terminales. En dicho segundo proceso intervienen las células gliales, que interponen finos pseudópodos entre los elementos presinápticos y los postsinápticos. La desconexión de sinapsis a través de este mecanismo se ha observado en relación con el control fisiológico de la secreción de hormonas por terminales hipotalámicos, así como con la pérdida de aferentes en las neuronas axotomizadas. No se conocen los mecanismos moleculares que subyacen en ambos procesos. Se sospecha, sin embargo, que en la degeneración espontánea de terminales está implicada la degradación de microtúbulos, controlada a su vez por la concentración intracelular de calcio. Si recordamos que la actividad sináptica conlleva variaciones considerables en la concentración de iones calcio intracelular, resultará fácil admitir que el nivel de actividad sináptica puede controlar la vida media de las terminaciones nerviosas.

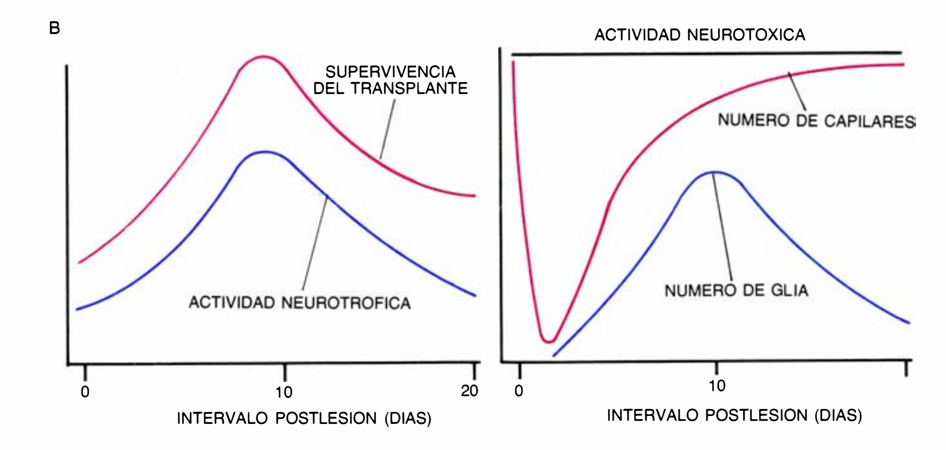
A la desconexión de la sinapsis se opone la formación de nuevos contactos nerviosos. Este proceso implica el crecimiento de axones o dendritas (o ambas cosas) y la posterior diferenciación de las estructuras características de las sinapsis maduras. La formación de brotes axonales parece tener dos requerimientos esenciales: la presencia de moléculas específicas, que reciben la denominación común de *factores de crecimiento* o *factores tróficos*, y la existencia de un substrato apropiado para la adhesión y el crecimiento de las nuevas fibras.

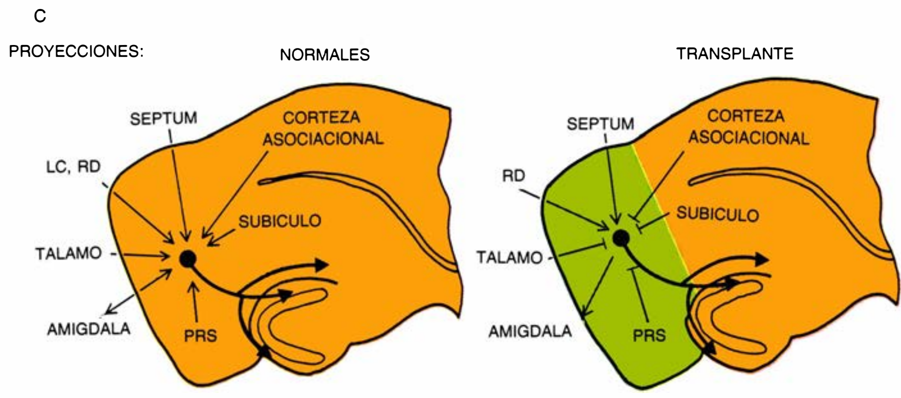
Hay varios tipos de factores de crecimiento. Citemos, por ejemplo, los factores neurotróficos, o neuronotróficos, sin los cuales las células nerviosas no podrían sobrevivir. Muchas sustancias cumplen ese requisito; por ejemplo, la glucosa o los iones potasio. La característica distintiva de los factores neurotróficos es que actúan a concentraciones bajísimas y suelen ser polipéptidos de peso molecular bastante bajo. Aunque se desconoce su mecanismo de acción a nivel molecular, parecen intervenir en procesos neuronales básicos: transporte de iones y metabolitos. Se admite la existencia de varias familias de factores neurotróficos, específica cada una de ellas de un grupo definido de neuronas. Así, el factor de crecimiento nervioso, NGF, resulta esencial para la supervivencia de las neuronas simpáticas; se conocen, asimismo, otros factores neurotróficos específicos de las neuronas parasimpáticas, las motoras y las sensoriales. Pero queda mucho por averiguar en este campo antes de avanzar una clasificación racional de esas moléculas.

Casi todos los estudios de los factores de crecimiento se han realizado *in vitro*, utilizando técnicas de cultivo de células. En esas condiciones, a cortos tiempos de incubación, no se pueden distinguir los axones de las dendritas. Y se opta por llamar *neuritas* a las prolongaciones que exhiben las neuronas en cultivo. Los factores neurotróficos, en general, no causan el brote de neuritas. Se trata sólo de factores permisivos, por cuanto permiten que las neuronas sobrevivan y se muestren receptivas a las instrucciones que provengan de factores específicos, responsables de modificaciones definidas, tanto estructurales como funcionales.

Tres son las clases de factores instructivos que revisten interés en la renovación de la sinapsis en los adultos: los factores neuritogénicos, que causan la aparición de neuritas; los factores quimiotácticos o direccionales, que dirigen la orientación del crecimiento de las neuritas, y los factores que dirigen la elección del neurotransmisor. Estos últimos no han recibido todavía ninguna denominación identificadora, pero se ha comprobado ya su existencia tanto en el sistema nervioso periférico, como en el central. Algunos factores poseen varias de esas actividades. Así el NGF es un factor de supervivencia para neuronas simpáticas, para algunas neuronas sensoriales y para las neuronas colinérgicas del SNC. En las neuronas simpáticas, el NGF desempeña también funciones neuritogénicas y quimiotácticas. En el caso de las neuronas sensoriales, el NGF es muy eficaz como factor neurotrófico y neuritogénico cuando actúa asociado a la laminina, una proteína de la membrana basal de alto peso molecular. Esta proteína, por sí sola o asociada a una proteína heparan-sulfato, regula, así parece, la aparición de neuritas en el sistema nervioso periférico durante el desarrollo y tras una lesión.







5. POSIBILIDAD DE TRASPLANTE DE SNC para reparar SNC lesionado. La cavidad creada en el SNC de un animal sirve de modelo de área lesionado. La supervivencia e integración de trasplantes de tejido cerebral introducidos en un cavidad del cerebro huésped mejoran notablemente si se permite un intervalo entre la formación de la cavidad y la colocación en ella del trasplante (*A*). Durante ese intervalo, el tejido cerebral del huésped produce cantidades crecientes de mitógenos y de factores neurotróficos y neuritogénicos. La dependencia de la supervivencia de los trasplantes respecto del intervalo de postlesión guarda una estrecha relación con dos considerandos: el contenido de factores neurotróficos en el tejido que forma las paredes de la cavidad y el número de células gliales que hay en dichas paredes. No se observa ninguna correlación con el número de nuevos capilares sanguíneos, ni con la concentración de neurotoxinas (*B*). Hasta el momento, la integración de los trasplantes en el tejido huésped resulta incompleta (*C*). Así los trasplantes de corteza entorrinal envían axones a zonas correctas del cerebro huésped y forman conexiones específicas. Sin embargo, sólo reciben del huésped dos de los siete aferentes que inervan esta corteza: los provenientes del septum y el rafe dorsal (*RD*). Por su parte, los aferentes que proceden del locus coeruleus (*LC*), subículo (*Sub*), presubículo y prosubículo (*PrS*), amígdala (*Amig*) y corteza asociacional no inervan el trasplante.

No existe acuerdo en cuáles sean las células responsables de la producción de factores de crecimiento. Según una hipótesis, los factores procederían de las células postsinápticas y la inervación de dichas neuronas regularía su producción de factores tróficos. La producción de factores decaería cuando la inervación es completa y aumentaría tras la denervación total o parcial. Esta hipótesis explicaría por qué en el SNC los brotes axonales se extienden muy poco y por qué, cuando se induce su crecimiento más prolongado, los terminales no penetran profundamente en el tejido del SNC; después de una lesión, los brotes axonales de origen local repoblarían rápidamente los sitios postsinápticos vacantes, deteniendo la producción de factores de crecimiento por las células deaferentadas. La validez de esta hipótesis se ha comprobado en el sistema motoneurona-músculo, pero no en el SNC.

En el SNC, la glía constituye otro de los principales suministradores de factores de crecimiento. El curso temporal del aumento de los factores neuritogénicos en el hipocampo tras una lesión de la corteza entorrinal guarda una estrecha correlación con el curso temporal de la gliosis en esta estructura, así como con la cinética de formación de brotes axonales por las fibras comisurales. Experimentos sencillos en los que se examina, por un lado, *in vivo*, la anatomía de la respuesta celular y. por otro, *in vitro*, la producción de factores de crecimiento, permiten obtener pruebas indirectas de las células productoras de factores y de las células que constituyen el blanco de la acción de esos péptidos.

¿Cuál es la especificidad de los factores tróficos inducidos por las lesiones? Es posible que determinadas lesiones de cierto tipo de neuronas produzcan factores neurotróficos y neuritogénicos exclusivamente específicos de tales células nerviosas. Más probable resulta, sin embargo, que los factores producidos en respuesta a las lesiones tengan una especificidad amplia, es decir, afecten a familias de neuronas más que a tipos neuronales únicos. Y cabe también que coincidan ambas posibilidades y no dispongamos todavía de datos suficientes para responder a esa pregunta. Otra cuestión importante en torno a los factores neuritogénicos es la relativa a la diferencia entre brotes reactivos y brotes regenerativos. ¿Son los factores que causan la formación de brotes en axones ilesos idénticos a los que determinan la aparición de brotes regenerativos en los axones seccionados? Tampoco aquí disponemos de datos que nos permitan responder con exactitud a la pregunta.

Sabemos muy poco sobre la etapa final de la renovación de las sinapsis, entendiendo por tal la maduración de los nuevos contactos sinápticos. El cerebro contiene moléculas solubles capaces de inducir la aparición de características postsinápticas en la membrana basal del músculo. En la unión neuromuscular, la laminina, actuando en conjunción con una substancia desconocida de origen neuronal, induce la formación de grupos de receptores de neurotransmisor en la membrana postsináptica. Además, después de axotomizar las neuronas motoras, los componentes de la membrana basal del músculo previamente inervado son capaces, por sí solos, de definir el sitio preciso donde los terminales regenerativos formarán nuevos contactos. En este caso, la membrana basal del músculo dirige también la formación y diferenciación

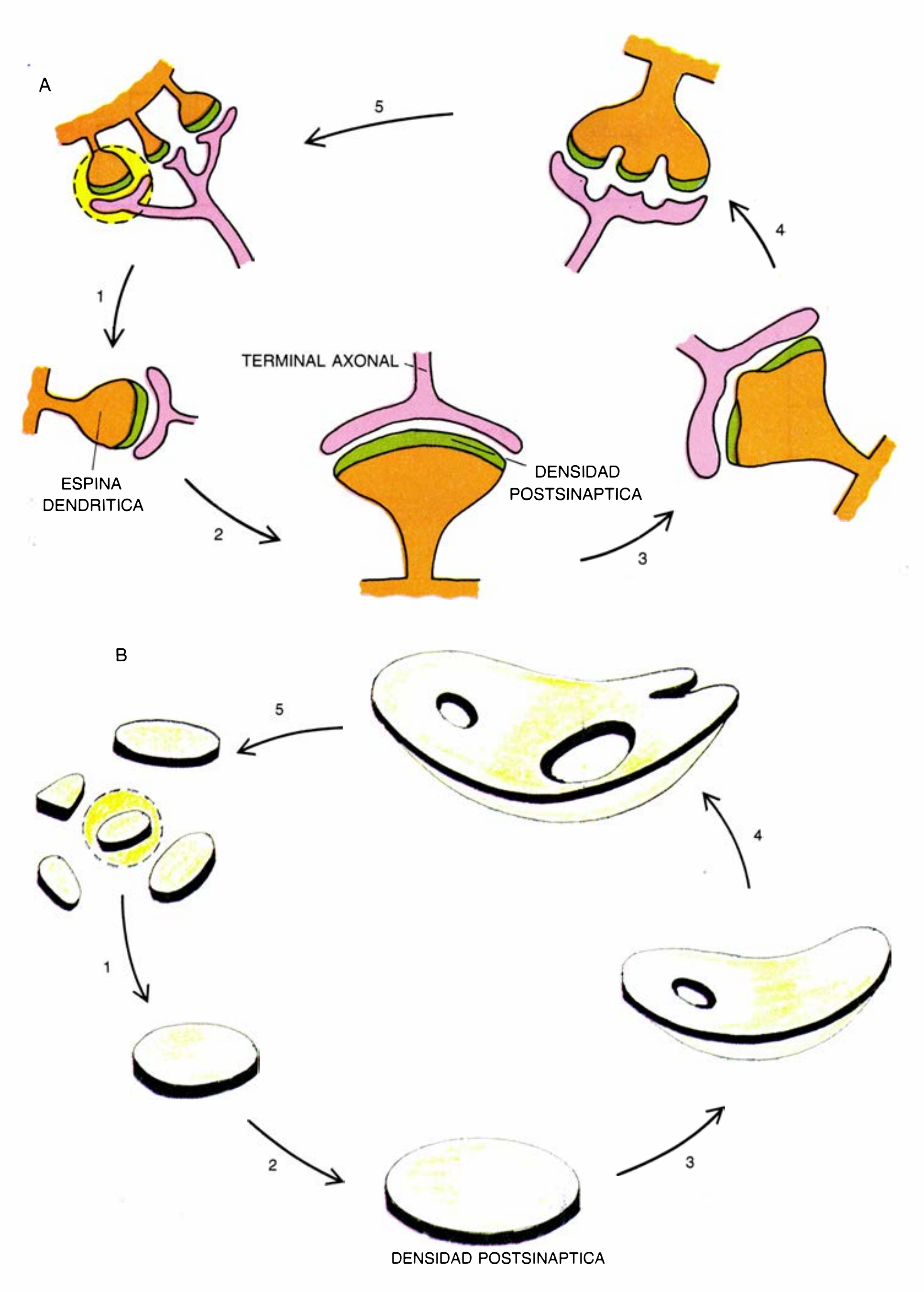
de uniones neuromusculares maduras, con aparición de vesículas presinápticas y de plegamientos postsinápticos. El SNC carece de lámina basal, pero los abundantes proteoglicanos extracelulares podrían desempeñar un papel análogo, organizando la formación de nuevas sinapsis.

Las estructuras que caracterizan a una sinapsis madura en el SNC son las vesículas presinápticas en los terminales y las densidades postsinápticas (DPS) en las espinas dendríticas. Cuando el SNC adulto se observa al microscopio electrónico, las DPS son las estructuras subsinápticas más prominentes. Durante la renovación sináptica, las DPS muestran el mismo carácter dinámico que las sinapsis a las que pertenecen. Dependiendo de su localización en el SNC, cuando una sinapsis pierde su componente presináptico, la DPS correspondiente se conserva unas veces y, en otros casos, desaparece a las pocas horas de la deaferentación. Lo mismo que las sinapsis, las DPS parecen estar también implicadas en un ciclo de renovación, cuyos intermediarios se pueden observar al microscopio electrónico. Entre esos intermediarios se encuentran DPS con perforaciones e indentaciones múltiples que, probablemente, se acaban degradando en pequeños fragmentos; cada uno de estos puede ser el núcleo de una nueva sinapsis y, tal vez, de una nueva espina dendrítica.

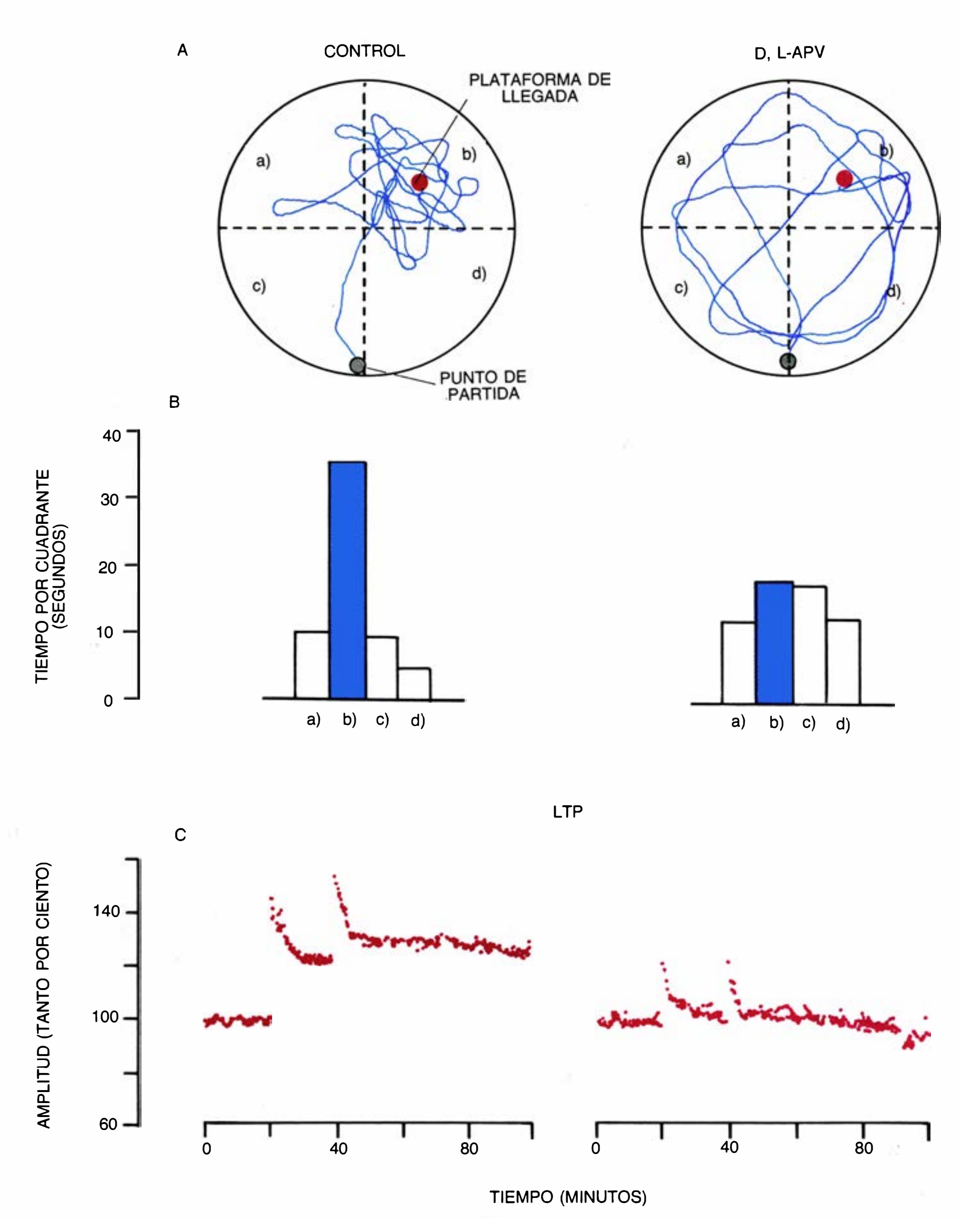
Se ha venido aceptando que las lesiones del SNC eran irreversibles e, imposible, la regeneración del mismo. Sin embargo, el estudio de la plasticidad neuronal y la nueva información disponible están permitiendo una visión más optimista. Y así, los investigadores comienzan a inclinarse por la posibilidad de que el SNC dañado se llegue a reparar. Tal vez el SNC no se regenere, o sea, no vuelva a ser idéntico a como era antes de la lesión. Creemos, no obstante, que un mayor conocimiento de los mecanismos celulares y moleculares de la plasticidad neuronal permitirá la sustitución de las estructuras y circuitos lesionados por otros que posibiliten la recuperación funcional.

En el presente estado de las investigaciones, resulta difícil indicar los pasos que ese tipo de intervención seguirá. Dos objetivos claros son impedir la extensión de la lesión inicial (la llamada muerte neuronal secundaria) y sustituir los circuitos destruidos. Apoyándome en estudios de animales con lesiones cerebrales, he sugerido la necesidad de intervenciones múltiples. Inmediatamente después de la lesión, el tratamiento con antagonistas de neurotransmisores excitatorios, unido al trasplante de astrocitos, permitiría detener la muerte celular secundaria. Posteriormente, cuando la producción de factores neurotróficos y neuritogénicos por parte del tejido lesionado alcanza su máximo, el trasplante de neuronas de un donador permitiría reconstruir los circuitos interrumpidos, probablemente sustituyendo circuitos monosinápticos por relés. Los mecanismos de plasticidad intrínsecos al tejido dañado asegurarían la funcionalidad de las conexiones, de forma análoga a los mecanismos compensatorios que actúan en los experimentos de inervación cruzada de Tsukahara.

La perspectiva actual sobre la posibilidad de corregir las consecuencias de las lesiones del SNC es ciertamente optimista. Los nuevos avances en técnicas de trasplante han dado ya resultados positivos en el caso de la enfermedad de Parkinson. Las lesiones cuya compensación requiere conexiones precisas presentan un problema más difícil, aunque abordable.



6. LAS DENSIDADES POSTSINAPTICAS parecen estar implicadas en un proceso de crecimiento y degradación. Dicho proceso se ilustra mediante un ciclo (*B*) en el que las DPS crecen por adición de nuevo material (*1-5*). Al adquirir cierto tamaño, las DPS se perforan y agrietan, para acabar fragmentándose en DPS de pequeño tamaño: cada una de las cuales puede recomenzar el ciclo. La generación de nuevas DPS podría implicar la formación de nuevas espinas dendríticas y, por ende, de nuevas sinapsis (*A*).



7. EL APRENDIZAJE OCURRE CONCOMITANTEMENTE con el reforzamiento o potenciación sináptica de larga duración (*LTP*). Se habitúa a los animales de experimentación a que naden en una piscina circular llena de una solución acuosa opaca (*A*). Para descansar, deben encontrar la plataforma sumergida (*rojo*). Las trayectorias seguidas por los animales (*línea irregular de a*) se registran con una cámara de televisión acoplada a un ordenador que calcula el tiempo que el animal permanece en cada cuadrante (*B*). Si se retira la plataforma, los animales entrenados prefieren nadar en el cuadrante donde solía estar la plataforma. Los animales a los que se les ha implantado una cánula que infunde intraventricularmente un antagonista del ácido N-metil-D-aspártico (D,L-APV) no parecen aprender, a juzgar por el carácter errático de sus trayectorias de natación. La falta de aprendizaje se refleja en que nadan tiempos equivalentes en los cuatro cuadrantes. Las ratas entrenadas que han aprendido la localización de la plataforma presentan LTP en la proyección entorrinal hacia el giro dentado. El antagonista D,L-APV bloquea la formación de LTP (*C*).

Hasta aquí nos hemos ocupado del SNC como si estuviera compuesto sólo de neuronas. El otro componente celular esencial del sistema nervioso son las células gliales. A la glía, Ruldof Virchow, su descubridor, le atribuyó un papel secundario de unión y sostén de las neuronas. Tal vez por ello, el estudio de la glía ha recibido poca atención en comparación con la dedicada a las neuronas. Sin embargo, el número de las células de la glía decuplica el de neuronas, y hoy se acepta ya que intervienen de una manera destacada en la plasticidad del sistema nervioso. A medida que progresan las investigaciones se nos hace más evidente que el sujeto de estudio pertinente no es tanto la neurona cuanto la unidad glía-neurona.

Esta unidad, compuesta de varias células gliales en íntima asociación con cada neurona, constituye una unidad funcional y dinámica. Entre neuronas y glía parece existir un intercambio continuo de información, gracias a la cual los distintos tipos de glía actúan como guías en la migración de neuronas y axones durante el desarrollo, desconectan las sinapsis, fagocitan productos celulares de desecho, se relacionan con el sistema inmune, contribuyen a la barrera hematocefálica, captan y metabolizan neurotransmisores, suministran a las neuronas metabolitos y factores de crecimiento y controlan la composición iónica del medio extracelular. Estas propiedades confieren a la glía la capacidad de servir de monitor de la actividad neuronal y actuar sobre la composición del medio para adaptarla a los requerimientos de las neuronas.

La asociación glía-neurona funciona, en lo que respecta a la composición del micromedio ambiente del SNC, como un servomecanismo cuyo punto de equilibrio viene determinado por el ritmo habitual de actividad neuronal. Las neuronas son células muy especializadas que sólo pueden cumplir su papel porque cuentan con el apoyo del tejido enormemente versátil que constituye la glía.

La renovación de las sinapsis puede completarse al cabo de unas horas de su iniciación. Es un ritmo suficiente para mediar el mantenimiento de los circuitos neurales, la respuesta a las lesiones, la adaptación a cambios fisiológicos y algunos tipos de aprendizaje y memoria. Se trata de procesos bastante lentos, cuyos estados intermedios son susceptibles de observación microscópica. Sin embargo, el organismo está capacitado para adaptarse a cambios que tienen lugar a una escala de minutos o segundos. Las modificaciones del sistema nervioso que operan en esa escala temporal deben ser cambios en la función de las sinapsis. De hecho, la expresión "plasticidad sináptica" fue introducida por el psicólogo J. Konorski para designar procesos mediante los cuales modificaciones transitorias en la actividad sináptica producen cambios permanentes o de larga duración en la potencia de esas sinapsis. Para estudiar estos cambios, los métodos apropiados son las técnicas electrofisiológicas que registran la actividad eléctrica asociada con la comunicación interneuronal, tanto en el animal vivo como en secciones de tejido aisladas. Uno de los mecanismos de modificación rápida de los circuitos neuronales es la activación de sinapsis "silenciosas". Este proceso, aunque de importancia indudable, ha recibido poca atención y no se conoce bien.

En la actualidad, el cambio funcional mejor estudiado, asociado con la utilización repetida de las sinapsis, es el fenómeno del reforzamiento de larga duración, LTP (siglas inglesas de "long term potentiation"). Observado por vez primera en el hipocampo del conejo por Tim Bliss y colaboradores, del Instituto Nacional de Investigaciones

Biomédicas de Londres, este fenómeno consiste en lo siguientes: cuando se activa una sinapsis rápidamente con un estímulo constante, la respuesta sináptica se mantiene constante si el intervalo entre estímulos sucesivos es igual o mayor de 2-3 segundos. Ahora bien, si la frecuencia de estimulación se incrementa hasta 10 veces por segundo o más, transcurridos unos 20 segundos se observa un aumento considerable en la amplitud de la respuesta sináptica. Este aumento de la amplitud o LTP alcanza su máximo en escasos minutos y dura horas e incluso días.

Típicamente, el fenómeno de LTP se observa en estructuras del SNC que, como el hipocampo, se consideran implicadas en aprendizaje y memoria. Pero también ocurre en estructuras periféricas, como el ganglio cervical superior. Difiere del reforzamiento o potenciación post-tetánica, un fenómeno muy bien estudiado en la unión neuromuscular, en propiedades farmacológicas y en que su duración es, al menos, 10.000 veces superior. La estimulación por encima de cierta frecuencia es necesaria, pero no suficiente, para la inducción de LTP. Hace falta, asimismo, que la concentración intraterminal de iones calcio supere cierto umbral y que se activen simultáneamente cierto número mínimo de axones. Las condiciones precisas varían con la población concreta de sinapsis e incluso existen en el SNC sinapsis que no muestran LTP.

Hay varios tipos de experimentos que sugieren que el fenómeno de LTP se halla implicado en el aprendizaje y la formación de la memoria. En el hipocampo, los neurotransmisores excitadores que activan las sinapsis susceptibles de LTP son aminoácidos o ácidos tipo glutamato. De los varios tipos de receptores que median la transmisión glutamatérgica, los estimulados por el ácido N-metil-D-aspártico son los responsables de la aparición de LTP. Gary Lynch y colaboradores, de la Universidad de California en Irvine, han demostrado que el ácido 5-fosfonovaleriánico, un análogo estructural de neurotransmisor, impide la formación de LTP y al mismo tiempo bloquea el aprendizaje de tareas espaciales.

Otros experimentos apuntan también una relación entre memoria y LTP. Así, en ensayos llevados a cabo con ratas seniles, éstas presentan serias deficiencias en su memoria espacial y en la formación de LTP en el hipocampo. Más sugestivos resultan incluso los experimentos realizados por Steven Kelso y Tom Brown, de la Ciudad de la Esperanza de California en Duarte, quienes consiguieron inducir LTP mediante la estimulación secuencial de dos o más aferentes convergentes, utilizando intensidades y frecuencias que, aplicadas individualmente, eran incapaces de provocar el fenómeno. Este comportamiento remeda el condicionamiento de Paulov y refuerza la idea de que LTP puede ser uno de los substratos fisiológicos del aprendizaje y la memoria.

¿Cuáles son los mecanismos celulares y moleculares que explican el fenómeno de LTP? A pesar de que en los últimos años se ha ido acumulando la aportación de datos nuevos, no nos es lícito formular todavía ninguna conclusión firme en respuesta a la cuestión planteada. Se supone la intervención de cambios presinápticos y postsinápticos en el desarrollo del fenómeno. Los primeros conducirían a la liberación de mayor cantidad de neurotransmisor por impulso nervioso, mientras que los segundos elevarían la sensibilidad al neurotransmisor de la neurona postsináptica.

A los 10 o 15 minutos del comienzo de la estimulación de alta frecuencia, se empiezan a observar ya ciertos cambios morfológicos en las sinapsis afectadas por LTP. Se trata de modificaciones en la forma de las espinas dendríticas (las espinas se hacen más esféricas) y de un aumento de la proporción de sinapsis creadas en los troncos dendríticos. El cambio en la forma de las espinas desaparece a las dos horas, en tanto que el incremento en el número de sinapsis sésiles o situadas en troncos dendríticos se mantiene por períodos largos.

En resumen, el SNC es capaz de grabar cambios ambientales que ocurren en segundos. En un comienzo, esos cambios modifican la eficacia de las sinapsis. Más tarde, tales alteraciones funcionales se traducen en modificaciones anatómicas, que pueden observarse con la ayuda del microscopio electrónico. La relación entre cambios electrofisiológicos y anatómicos es, de momento, obscura. Se vislumbra una conexión entre la aparición de LTP, la inducción de un aumento en las concentraciones de factores de crecimiento y el cambio anatómico final. Cualquiera que sea el mecanismo preciso, su existencia permite unificar los conceptos derivados de los estudios de la renovación de la sinapsis, los estudios electrofisiológicos y los estudios de aprendizaje y memoria. Fenómenos que se dirían a primera vista dispares podrían hallarse interrelacionados con los distintos estadios de la plasticidad sináptica.

Peces intermareales

Los peces que viven entre los límites de la marea se encuentran, alternativamente, sometidos al azote de las olas y aislados en charcos. Anatomía, fisiología y comportamiento se adaptan al riguroso hábitat

Michael H. Horn y Robin N. Gibson

La zona intermareal (esto es, la banda de costa que se halla entre los límites de la bajamar y la pleamar) constituye un ambiente exigente. Alrededor de dos veces cada día, en bajamar, la zona intermareal se separa del mar abierto. El agua permanece bajo las rocas, en charcas de marea aisladas, empapando el sustrato y formando lodazales. Cuando, con la pleamar, el agua retorna, la zona intermareal queda sumergida y se conecta de nuevo al amplio ecosistema oceánico. Los animales que habitan en la zona intermareal deben resistir gran parte del tiempo fuera del agua o parcialmente expuestos al aire. El ciclo mareal les fija los períodos de alimentación; deben soportar notables variaciones de la composición química del agua, además de la acción del oleaje y la turbulencia casi constantes que caracterizan la zona.

Los animales sésiles (fijos) y de movimientos lentos que viven en la franja intermareal, así cirrípedos (bellotas de mar y percebes), lapas y bígaros, han sido objeto de numerosos estudios, ante todo porque abundan y resultan accesibles. Más difícil ha resultado la investigación de los peces intermareales, en parte debido a su movilidad y en parte porque suelen hallarse bien escondidos. Muchos se camuflan mediante una coloración protectora y en marea baja numerosas especies se esconden bajo piedras o entre masas de vegetación (aunque algunas, como los saltarines del fango tropicales, permanecen al descubierto sobre los lodazales).

Ello no obstante, en los últimos 15 a 20 años, nuestros conocimientos sobre esos peces ha aumentado hasta el punto de que puede ya dibujarse un cuadro bastante coherente de cómo se las arreglan en ese insólito hábitat. Nuestro trabajo y los estudios de otros investigadores han revelado que los peces intermareales se hallan notablemente bien adaptados al ambiente donde viven; no son meros animales oceánicos que han varado debido al reflujo de la marea. Han evolucionado hasta convertirse en componentes integrales del ecosistema intermareal y, en la costa, cada especie de pez ocupa una distribución vertical y un tipo de hábitat característicos.

Muchos peces intermareales exhiben las características anatómicas especializadas de los peces que viven sobre fondos de aguas someras y turbulentas. La más evidente es su pequeño tamaño. Los peces intermareales raramente sobrepasan los 30 centímetros de longitud y la mayoría no alcanza los 20. Su pequeño tamaño les permite ocupar agujeros, grietas y los huecos que se forman debajo de las piedras y reduce el riesgo de que les arrastre la marejada o las olas. La capacidad de muchos peces intermareales para vivir en espacios confinados se beneficia también de la posesión de un cuerpo muy delgado (en las gonelas −Fólidos− y pinchosillos −Estiqueidos−) o perfiles horizontales y aplanados (en los charrascos −Cótidos− y chafarrocas −Gobiesócidos−).

Además del tamaño y de la forma del cuerpo, en muchos peces intermareales resultan características las estructuras que configuran las aletas. Por ejemplo, los saltarines del fango (Perioftálmidos), que son muy terrestres, se elevan sobre sus aletas pectorales pares cuando se desplazan sobre tierra firme. En algunos peces intermareales (los chafarrocas, los gobios −Góbidos− y los limacos de mar −Lipáridos−), las aletas pélvicas están modificadas y forman ventosas suctoras mediante las cuales se fijan firmemente al sustrato. Por el contrario, en los peces más modificados para vivir en grietas o agujeros (como algunas gonelas y pinchosillos), las aletas pectorales y pélvicas son muy reducidas y las aletas dorsal y anales son largas, bajas y a menudo se encuentran unidas a la aleta caudal.

Por lo general la piel de los peces intermareales es dura, para que resista el roce constante contra el sustrato. Algunos peces carecen de escamas (tales los blenios −Blénidos− y los chafarrocas); en otros (como las gonelas y los pinchosillos) las escamas están muy reducidas y en otros todavía (los gobios) están firmemente sujetas. Muchos de esos peces segregan gran cantidad de mucus, que puede proporcionar lubricación para mejor desenvolverse en espacios confinados. (También reduce la pérdida de agua cuando los peces se hallan expuestos al aire.)

Un rasgo común de los peces intermareales es el de su coloración críptica. Es famosa la notable capacidad de los peces planos (Pleuronectiformes) de las costas arenosas (por ejemplo, la solla y el fletán de California) de que su pigmentación remede los colores y los dibujos del fondo. En las costas rocosas, donde los colores del fondo resultan más variados, los peces intermareales presentan un amplio abanico de colores y dibujos. Las especies que viven entre la vegetación algal suelen tener colores sorprendentes, que copian los de las algas circundantes. Por ejemplo, las gonelas *Apodichthys flavidus* y *Xererpes fucorum* exhiben colores que van del canela al verde vivo, pasando por el rojo oscuro, en función del color de las algas en las que vivan. Estos peces, que cambian de color lentamente, parecen obtener los pigmentos de los invertebrados que constituyen sus presas, que también viven entre las algas. Otros ejemplares cambian de color en cuestión de segundos, para imitar el de

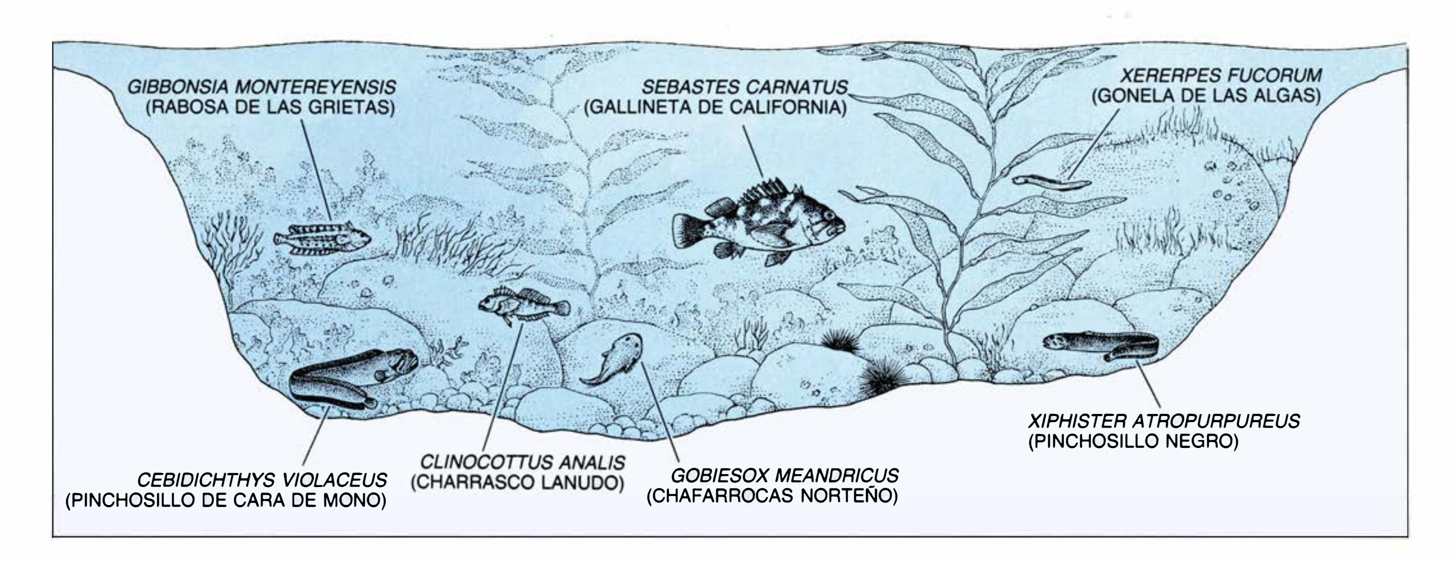
los invertebrados sésiles o el de superficies rocosas incrustadas.

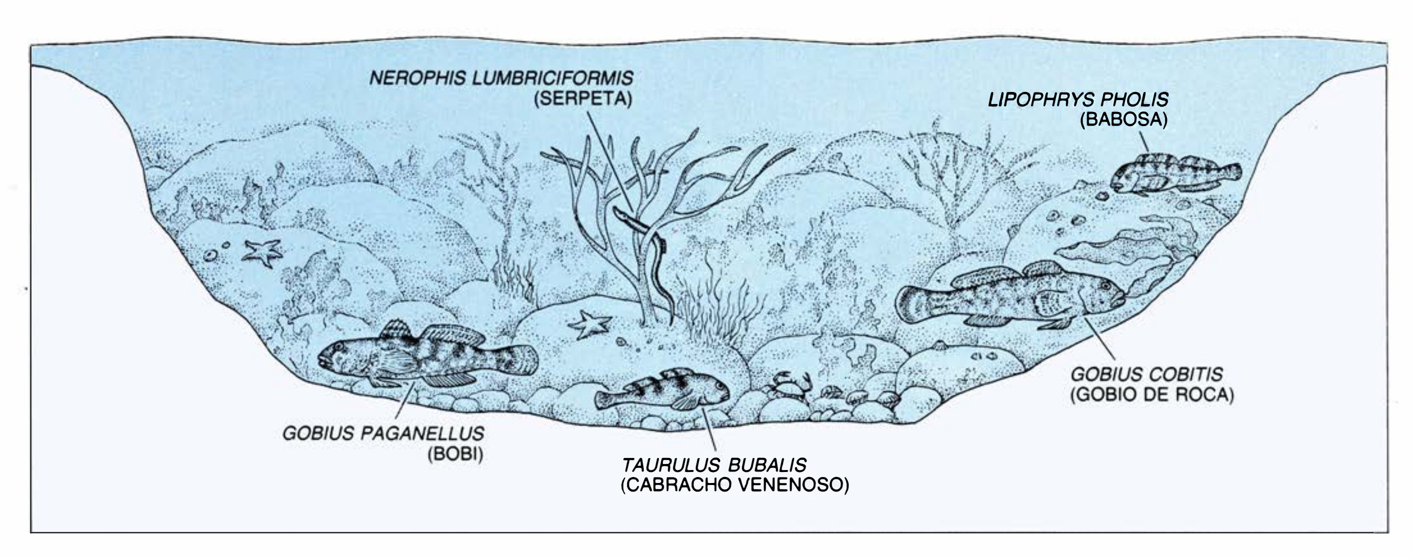
Muchos peces intermareales tienen flotabilidad negativa (son más pesados que el agua del mar), lo que les permite permanecer sin esfuerzo sobre el fondo, donde encuentran refugio inmediato y la velocidad del agua es mínima; carecen de vejiga natatoria (el órgano lleno de gas característico de la mayoría de los peces óseos) o la tienen muy reducida. El peso específico relativamente alto de los peces intermareales explica en parte su penosa natación, que por lo general consiste en breves excursiones desde sus refugios o en desplazamientos rápidos y cortos de un lugar a otro.

La región intermareal experimenta fluctuaciones frecuentes y espectaculares de las condiciones ambientales, que amenazan a sus habitantes con la desecación durante la exposición al aire y los enfrentan a variaciones de la disponibilidad de oxígeno, salinidad y temperatura letales para otras especies. Los peces que residen aquí deben hallarse equipados, etológica y fisiológicamente, para superar esos grandes cambios. Entre las especies intermareales se advierten también diferencias de tolerancia a esos rigores, en particular la desecación. Esas variaciones determinan en parte la distribución vertical de las especies en la costa.

Varios estudios han demostrado que muchos peces intermareales toleran una considerable pérdida de agua. Por ejemplo, William H. Eger, mientras cursaba su licenciatura en la Universidad de Arizona, encontró que ciertos chafarrocas del golfo de California sobrevivían hasta 93 horas fuera del agua si la humedad era elevada (del 90 por ciento), y soportaban pérdidas de agua de hasta el 60 por ciento de su contenido hídrico total en ambientes de baja humedad (del 5 por ciento). Tal pérdida de agua supera la que toleran la mayoría de los anfibios estudiados hasta el presente. (En realidad, ciertos peces intermareales, los saltarines del fango tropicales, *son* prácticamente anfibios: a diferencia de muchas otras especies intermareales, suelen ser activos fuera del agua y pueden pasar del 80 al 90 por ciento de su tiempo en tierra.)

Diversas características anatómicas reducen, en algunas especies, la tasa de desecación (engrosamiento de la epidermis y presencia, en la piel, de células secretoras de mucus); por lo que se sabe, los peces intermareales carecen de otros mecanismos fisiológicos para reducir o evitar la pérdida de





1. PECES INTERMAREALES comunes a lo largo de la costa de California (*arriba*) y de la costa altántica francesa (*abajo*), ilustrados en hipotéticas charcas de marea en pleamar, cuando son activos. En marea baja, los peces suelen esconderse entre las algas o bajo las piedras. Aunque cada localidad alberga un conjunto propio de especies, los peces comparten características anatómicas que les permiten esconderse en espacios reducidos y soportar la acción del oleaje; verbigracia: pequeño tamaño, cuerpo delgado o perfil aplanado y aletas pélvicas (las aletas pares ventrales) reducidas o modificadas para adherirse al fondo.

agua. De hecho, expuestos al aire, los peces vivos y muertos pierden peso con un ritmo aproximadamente igual. Parece, pues, que el comportamiento (por el simple expediente de evitar las condiciones de desecación) desempeña un papel importante en la supervivencia. La mayoría de las especies permanecen inactivas cuando se hallan expuestas a la marea baja. Los peces que son activos fuera del agua, así los saltarines del fango y los saltarines de las rocas (que no están emparentados entre sí), se protegen de la desecación de la piel y de las superficies respiratorias volviendo con frecuencia al agua o dejándose al alcance del oleaje o de las salpicaduras.

Los cambios de la disponibilidad de oxígeno plantean dos tipos de problemas a los peces intermareales. En primer lugar, los peces deben, como sea, obtener oxígeno aunque permanezcan fuera del agua durante varias horas. En realidad, la disponibilidad de oxígeno no plantea ningún problema, puesto que la concentración de ese gas es mucho mayor en el aire que en el agua saturada; la dificultad estriba en adquirir el oxígeno atmosférico. En general, las branquias tienden a colapsarse en el aire; su estructura delgada y flexible está mucho mejor adaptada a operar bajo el agua. El problema se resuelve, en los saltarines del fango y de las rocas, mediante la presencia de filamentos branquiales más cortos y gruesos, que evitan el colapso de las branquias y les permiten respirar aire. La mayoría de especies que respiran aire poseen otras características especializadas: un número superior de vasos sanguíneos en la piel y en el revestimiento de la boca y la faringe.



2. COSTA ROCOSA de la península Olímpica, Washington, cuyas charcas de marea, rocas y algas ofrecen distintos hábitats a los peces intermareales. Es un ambiente turbulento y dinámico: los peces que aquí moran deben soportar el oleaje, la marejada y los rigores fisiológicos que imponen el flujo y reflujo.

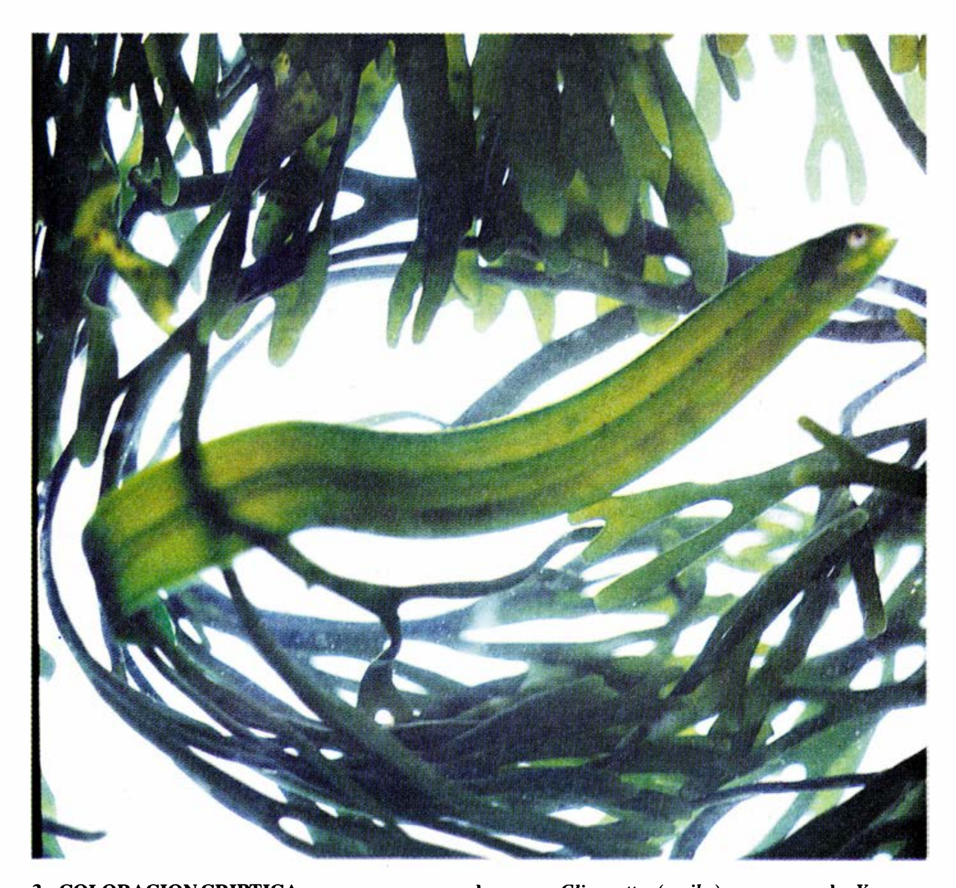
En estas especies que respiran aire, la tasa de respiración en aire iguala casi la tasa de respiración en agua. Además, y según Christopher R. Bridges, de la Universidad de Düsseldorf, las concentraciones de lactato en sangre y músculo de las especies intermareales indican que la tasa de metabolismo anaerobio (el metabolismo en el que no participa directamente al oxígeno) no aumenta cuando los peces se hallan expuestos al aire, lo que prueba que el suministro de oxígeno a las células no se reduce gran cosa cuando los peces tienen que respirar aire. Por tanto, los peces actúan fuera del agua sin ningún cambio importante de sus mecanismos metabólicos.

El segundo tipo de problema respiratorio se les plantea a los peces intermareales que habitan en charcas de marea aisladas y alejadas del límite de la bajamar. La fotosíntesis de las algas y la respiración por las plantas y los animales residentes provocan fuertes oscilaciones diarias de las cantidades de oxígeno y de dióxido de carbono disueltos en esas aguas. Durante el día, la fotosíntesis de las algas aporta cantidades de oxígeno que superan las demandas respiratorias de los habitantes de la charca, alcanzándose altos niveles de oxígeno y bajos de dióxido de carbono. Por la noche, cuando la fotosíntesis cesa, la respiración de los animales y las plantas de la charca reduce el nivel de oxígeno y aumenta el de dióxido de carbono.

No parece que, durante el día, los peces de las charcas de marea modifiquen su tasa de consumo de oxígeno en respuesta a las condiciones dominantes. Sin embargo, por la noche, algunas especies limitan su consumo de oxígeno para contrarrestar la menor disponibilidad de este gas. Se ha observado que, cuando el oxígeno alcanza niveles bajos críticos, algunas especies ventilan sus branquias en la delgada película de agua de la superficie de la charca, en la que hay más oxígeno disuelto; en el laboratorio, los peces mantenidos en un acuario en un nivel de oxígeno disuelto extremadamente bajo emergen a veces del agua y suben a las superficies expuestas.

Con sus características anatómicas y fisiológicas insólitas, los peces de la zona intermareal desarrollan pautas de comportamiento que les son distintivas. Así, la mayoría de peces intermareales comparten una misma pauta de reproducción. En primer lugar, el macho selecciona un sitio de freza, en





3. COLORACION CRIPTICA que enmascara a un charrasco, *Clinocottus* (*arriba*), y a una gonela, *Xererpes fucorum* (*abajo*), contra sus fondos respectivos, una esponja y una masa de algas. Este camuflaje, que probablemente brinda protección frente a los depredadores, es común en especies de las charcas mareales. El charrasco cambia de color para copiar el de su entorno mediante células pigmentarias especializadas; la gonela obtiene aparentemente su color verde de los invertebrados que depreda. El charrasco fue fotografiado en su hábitat por Anne Wertheim y, la gonela (un ejemplar cautivo), por uno de los autores (Horn).

una zona resguardada (bajo una piedra o entre la vegetación) que en muchas especies se halla dentro de un territorio que el macho defiende antes y después de la freza. Luego atrae a una o más hembras al lugar; cada hembra deja una sola puesta de huevos sobre el sustrato. El macho fecunda los huevos y luego suele guardarlos hasta que hacen eclosión.

La obligación de escoger y proteger un lugar críptico para la puesta impone una serie de limitaciones al comportamiento de cortejo del macho. No puede abandonar el lugar para buscar pareja, por lo que debe atraer a las hembras; recurre, para ello, a numerosas exhibiciones. Por ejemplo, algunos blenios macho advierten de su presencia ejecutando rizos verticales, e inducen a entrar la hembra en el lugar de freza mediante vigorosos movimientos de cabeza. La capacidad de atracción del macho mediante exhibiciones se ve aumentada por la posesión de tentáculos, crestas y modelos de color distintivos. Para la comunicación entre los sexos, algunas especies utilizan también feromonas, señales olorosas específicas.

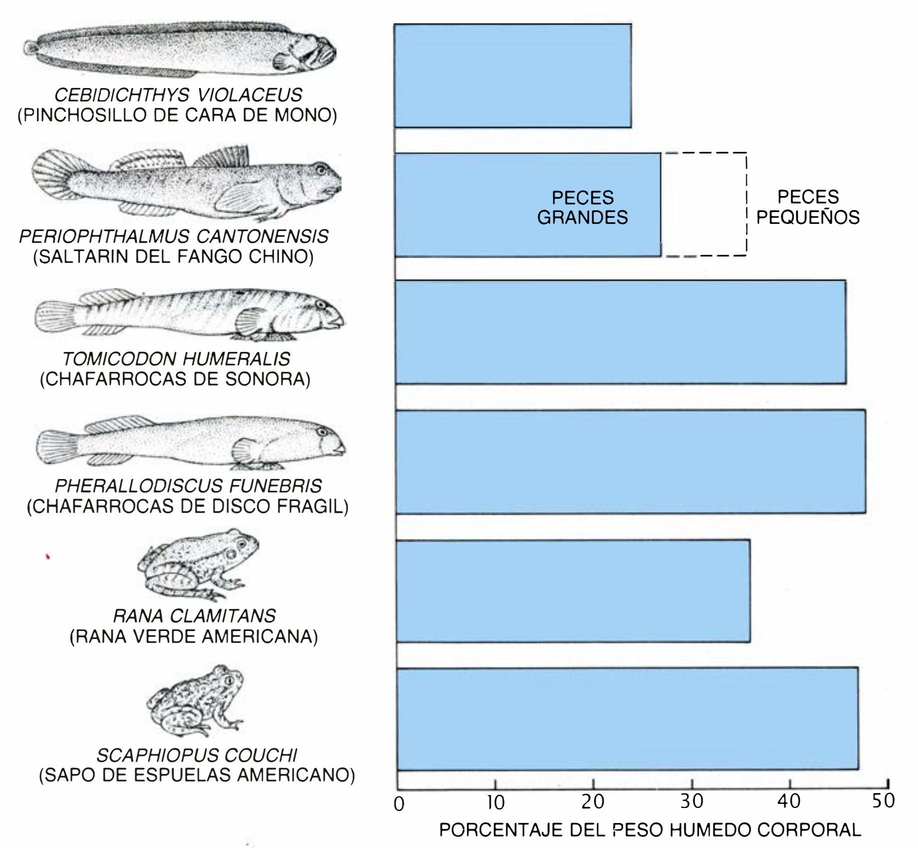
El cuidado paterno de los huevos es regla general, tanto si se encuentran fijados al sustrato (como ocurre en la mayoría de las especies) como si el progenitor se encarga de hacer de ellos una masa cohesiva, pero no fijada. Por lo general, es el macho quien guarda los huevos, aunque en algunas especies le corresponde esa tarea a la hembra y, en otras, a ambos progenitores. El cuidado paterno salvaguarda a los huevos de los depredadores y evita probablemente que los arrastren la marejada y el oleaje.

Después de eclosionar, las larvas de la mayoría de peces intermareales se desarrollan en el mar abierto, incluidas en el plancton. Sigue constituyendo en gran parte un misterio el procedimiento de que se sirven para retornar a la zona intermareal. Se ha propuesto que intervienen en ello las manchas aceitosas (*slicks*), en forma de lenguas de agua de superficie lisa, que corren aproximadamente paralelas a la costa, producidas por la acción de olas oceánicas internas, o subsuperficiales. Investigaciones recientes han demostrado que los *slicks* presentan concentraciones más altas de larvas de peces que las áreas de superficie ondulada adyacentes. Los *slicks* son estructuras costeras comunes en las regiones donde la temperatura o la salinidad de la columna de agua cambian bruscamente con la profundidad; suelen avanzar lentamente hacia la costa. Quizá proporcionen a las larvas de algunos peces intermareales un mecanismo de retorno a la zona entre mareas.

Pero, de acuerdo con las investigaciones realizadas por Jeffrey B. Marliave, del Acuario Público de Vancouver, las larvas de algunas especies no precisarían tal arrastre desde aguas más distantes. Observó que las larvas de algunas especies de zonas rocosas permanecían cerca de la costa, resistiendo las fuerzas que tendían a dispersarlas hacia alta mar o a lo largo de la costa. En esas especies, los individuos procedentes de regiones distintas tendrían muy pocas posibilidades de mezclarse, hasta el punto de que poblaciones más o menos inmediatas, a lo largo de la línea de costa, podrían quedar genéticamente aisladas.

Otra característica común de muchos peces intermareales es la de su habilidad para volver a casa. Deben emprender periódicas excursiones en busca de alimentación, con el riesgo consiguiente de quedar varados en lugares desfavorables, con marea baja. Muchas especies han desarrollado una capacidad de retorno al hogar que les permite volver a un refugio adecuado, generalmente una charca de marea. (Las especies que no precisan esas charcas intermareales, pues viven bajo rocas o entre la vegetación, suelen carecer de ese recurso.) La capacidad de retornar al hogar y de familiarizarse con la topografía de un lugar determinado puede también ayudar a los peces intermareales a escapar de los depredadores y de las aguas turbulentas en pleamar.

La mayoría de estudios del comportamiento de retorno al hogar se han realizado hasta ahora en el charrasco de los charcos de marea, *Oligocottus maculosus*. Una técnica convencional consiste en etiquetar peces capturados en una zona determinada, fijándoles cuentas de plástico de colores, y después trasladar los individuos marcados a un lugar distinto. El investigador vuelve luego al punto donde se obtuvieron los peces para ver cuántos pueden recapturarse. John M. Green, de la Universidad Memorial de Terranova, y Gwenneth J. S. Craik, a la sazón en la Universidad de la Columbia Británica, encontraron que hasta un 80



4. TOLERANCIA A LA DESECACION de algunos peces intermareales, de magnitud comparable a la de los anfibios. Los histogramas indican el porcentaje del peso normal hasta el que puede reducirse cada especie sin que el animal muera. La capacidad de sobrevivir a la pérdida de agua, favorecida por diversas características anatómicas, determina la altura sobre la costa a la que se encuentra la especie y su nivel de actividad en bajamar. Los saltarines del fango pueden arrastrarse sobre cenagales expuestos y respirar aire.

por ciento de *O. maculosus* retornaba a su charca nativa después de trasladarlos a distancias de hasta 100 metros. Los peces jóvenes mostraban menor capacidad de retorno al hogar que los mayores, y eran incapaces de conservar durante tanto tiempo como éstos dicha habilidad. Algunos de los peces más viejos retornaron tras haberlos mantenidos en el laboratorio hasta seis meses seguidos antes de soltarlos.

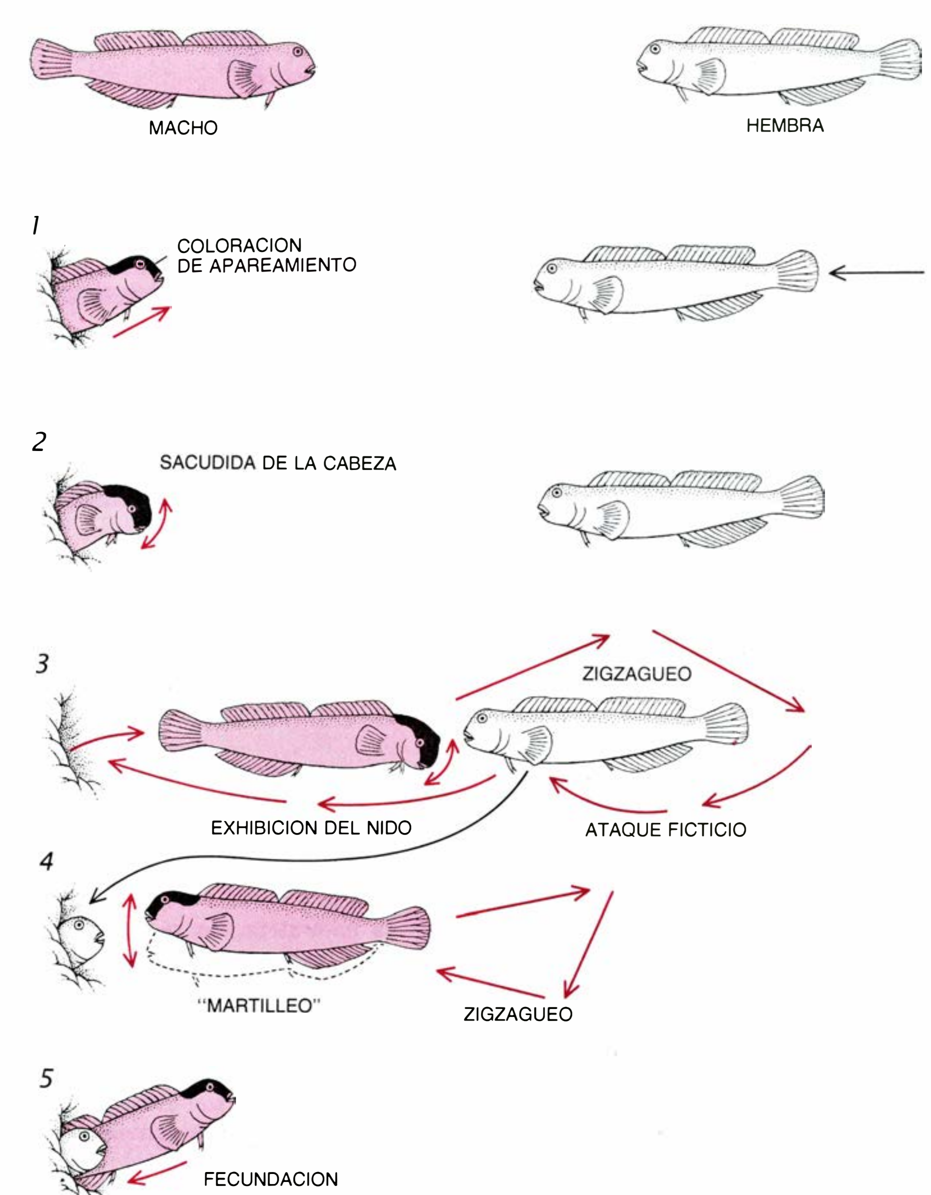
La vista y el olfato parecen desempeñar una importante misión en el retorno al hogar del charrasco de las charcas de marea; queda por esclarecer si un órgano predomina sobre el otro. Craik ha llegado a la conclusión de que los individuos de más edad se orientan con cualquiera de ellos, mientras que los más jóvenes precisarían de ambos sentidos.

Hay mucho por conocer sobre los pormenores y el significado del retorno al hogar. Las nuevas técnicas, basadas en la telemetría ultrasónica, posibilitan estudios más completos. En una investigación reciente, uno de los autores (Horn), en colaboración con Scott L. Ralston, de Deep Ocean Work Systems, se sirvió de la telemetría para rastrear los movimientos de varios pinchosillos de cara de mono (*Cebidichthys violaceus*), de manera continua y durante períodos de hasta dos semanas. Un pequeño transmisor fijado a la superficie interior del opérculo del pez emitía sonidos de alta frecuencia, que se detectaban con tres hidrófonos distribuidos por el fondo marino. Los hidrófonos enviaban las señales a un receptor y microordenador situado en la costa, que localizaba los individuos, pasaba los lugares a una pantalla y almacenaba la información para su análisis posterior.

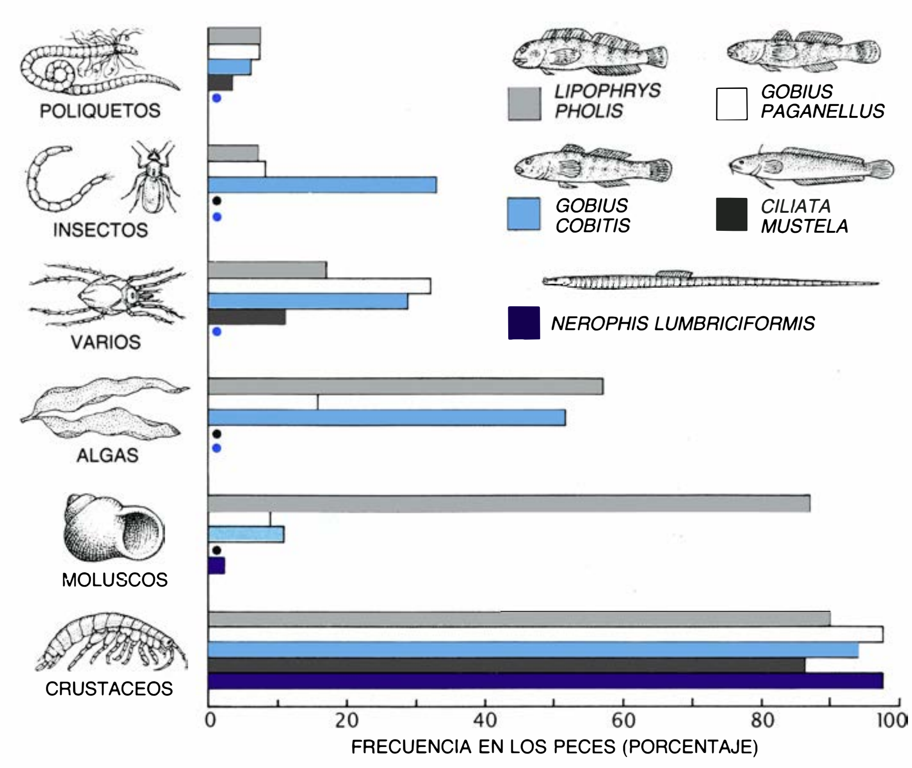
No había señales de retorno al hogar. Antes bien, nuestros resultados revelaban que el pinchosillo de cara de mono permanecía en el interior de un área vital de escasos metros cuadrados de hábitat intermareal. Se trata de una especie perezosa: los individuos sujetos a observación sólo mostraban actividad cinco minutos al día, en su mayor parte durante la subida de la marea. Esperamos aplicar la técnica a otras especies. La creciente miniaturización de los componentes de los transmisores permitirá pronto seguir los desplazamientos de peces más pequeños incluso que los pinchosillos que estudiamos, que medían de 23 a 41 centímetros de longitud.

Tiene que ser ventajoso para los peces intermareales percibir el estado y el movimiento de la marea, y así sincronizar su actividad con el ritmo regular de aquélla, de dos veces al día. Con ese fin responderían directamente a los cambios de temperatura, salinidad, turbulencia o intensidad de la luz, entre otras señales. Pero existe otro mecanismo: estudios recientes realizados por uno de nosotros (Gibson) han demostrado que incluso cuando esos indicadores potenciales se mantienen constantes en el laboratorio, algunos peces, pertenecientes a distintas familias, siguen exhibiendo ritmos de comportamiento relacionados con el período de marea. Alternan períodos de reposo en el momento previsto de bajamar local con tandas de actividad que coinciden más o menos con el tiempo previsto de pleamar.

¿Cómo se establece ese ritmo endógeno? Lo ignoramos; pero las investigaciones de laboratorio muestran que los cambios de la presión hidrostática asociados con la subida y el descenso de la marea son al menos responsables parciales. Muchos peces intermareales carecen de vejiga natatoria, el órgano que suele considerarse responsable de la detección de la presión por los peces óseos; continúa, pues, envuelto en el misterio el medio por el que detectan los cambios lentos de presión.



5. RITUAL DE CORTEJO de la babosa cariamarilla, *Lipophrys canevae*; permite al macho atraer a una hembra hacia su nido escondido, donde los huevos estarán relativamente seguros frente a la acción del oleaje y de los depredadores. El macho asoma (*1*), llama la atención de la hembra sacudiendo la cabeza (*2*) y sale nadando para cortejarla y persuadirla de que penetre en el nido (*3*). La hembra pone los huevos (*4*) y el macho se une a ella para fecundarlos (*5*). Nidos abrigados y cortejos complicados resultan comunes en los peces intermareales. El ritual que se muestra aquí lo describió E. F. Abel, de la Universidad de Viena.



6. DIETA DE LOS PECES INTERMAREALES. Está constituida por gran diversidad de invertebrados y plantas propios de las costas rocosas. Los histogramas indican la frecuencia con la que se encontraron varios alimentos en el estómago de especies intermareales estudiadas en Roscoff, Francia. La mayoría consume diversos invertebrados, en particular pequeños crustáceos, y algunas también ramonean vegetales marinos.

En la naturaleza, las respuestas de los peces a las mareas están moduladas a veces por ciclos diarios de luz y oscuridad, y quizá también por un ritmo circadiano propio (de unas 24 horas). Los estudios de campo han demostrado que muchas especies son estrictamente diurnas en sus pautas de actividad. Lo que podría hallarse relacionado con su dependencia de la visión para actividades fundamentales: alimentación, apareamiento y evitación de los depredadores. El conocimiento de los ritmos diarios de los peces intermareales, al igual que el de su comportamiento de retorno al hogar, aumentará mucho gracias a los estudios que hacen uso de la telemetría ultrasónica.

La zona intermareal constituye una región donde abunda el alimento. La gran cantidad y diversidad de materia orgánica viva allí presente, en particular en las costas rocosas de los mares templados, halla su réplica, en los múltiples tipos de alimentación que en esas zonas convergen. Las complejas interrelaciones de la cadena trófica intermareal se complican aún más porque muchas especies cambian de hábitos alimentarios estacional o anualmente, y otras cambian de régimen alimentario con su propio desarrollo.

La mayoría de especies de peces intermareales son carnívoras, algunas combinan los alimentos vegetales con los animales y unas pocas son estrictamente herbívoras. Revisten particular interés los peces intermareales que viven en climas templados y comen sobre todo algas. ¿Cómo obtienen una dieta adecuada de un alimento relativamente tan bajo en nutrientes (en particular proteínas) y cuyas paredes celulares están constituidas por celulosa, un material casi indigerible? Algunos biólogos marinos han sugerido que quizás esos peces no digieran los tejidos algales, sino que se alimenten de los organismos que viven en la superficie del alga.

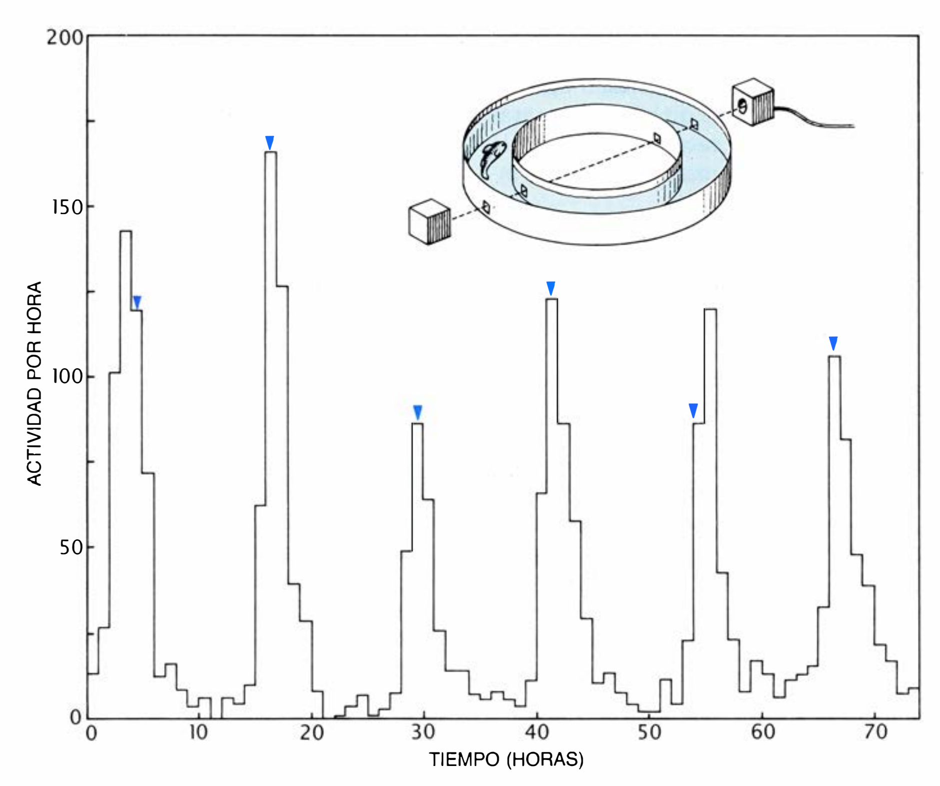
Los estudios del pinchosillo de cara de mono y de otro pinchosillo de California, *Xiphister mucosus*, realizados por uno de nosotros (Horn), junto con Steven N. Murray y Margaret A. Neighbors, de la Universidad estatal de California en Fullerton, han brindado información sobre los hábitos alimentarios de los peces intermareales. Comienzan siendo carnívoros, pero no han cumplido todavía un año de edad y se vuelven herbívoros; se alimentan entonces de ciertas especies de algas rojas y verdes, en particular las que resultan relativamente ricas en proteínas o carbohidratos. Siendo alumno de licenciatura en Fullerton, Kevan A. F. Urquhart demostró que, para digerir las algas, en vez de degradar sus paredes celulares mediante enzimas especializadas, el pinchosillo de cara de

mono retenía la comida en el estómago unas 50 horas y extraía gradualmente carbohidratos y proteínas del alga por acción de sus jugos estomacales, ácidos.

Se sabe poco acerca del impacto depredador de los peces intermareales sobre las poblaciones vegetales y animales de las costas rocosas. Algunos indicios sugieren que en el Gran Arrecife Barrera, por ejemplo, los peces que ramonean en la zona intermareal constituyen el principal factor de control de la abundancia y la composición de la biota intermareal. La investigación de las tasas a las que los peces intermareales de las costas rocosas de California consumen varios tipos de presas ha llevado a Gary D. Grossman, de la Universidad de Georgia, a proponer que esos peces ejercen fuertes presiones selectivas sobre muchas especies de algas y de invertebrados intermareales. El avance en este campo ha sido lento, dada la dificultad de manipular (o incluso determinar) el número y la distribución de los peces de la zona intermareal.

Se está todavía lejos de comprender enteramente las fuerzas evolutivas que subyacen a la colonización de la zona intermareal por parte de los peces. Tales especies están preparadas para afrontar las exigencias de su hábitat: toleran sus condiciones deshidratantes; soportan los cambios extremos de la composición química del agua; respiran aire cuando es necesario; comen gran variedad de recursos alimentarios y protegen sus huevos de los peligros físicos y biológicos.

Para entender la invasión de la zona intermareal por los peces en el contexto de la selección natural, debemos preguntarnos, sin embargo, qué ventajas ofrece vivir en ese lugar. No ha podido comprobarse si la zona intermareal ofrece niveles más bajos de competencia y depredación que los propios de la zona submareal adyacente. Con frecuencia se ha sugerido que la principal ventaja de vivir en la zona intermareal es la oportunidad de escapar de los depredadores acuáticos, pero en marea baja, cuando el peligro que suponen los depredadores acuáticos es menor, los peces intermareales resultan vulnerables a los depredadores terrestres y aéreos. Las ventajas relativas de la zona intermareal y el impacto de distintos tipos de depredadores son campos de estudio difíciles, aunque importantes, que sólo pueden explorarse mediante experimentos de campo cuidadosamente realizados.



7. RITMO INTERNO DE ACTIVIDAD DE LA BABOSA (*Lipophrys pholis*), medido en el laboratorio; muestra picos regulares que se corresponden con los momentos cuando se espera que haya marea alta (*triángulos*) en el ambiente natural del pez. El ritmo, característico de gran número de especies intermareales, se registró bajo condiciones constantes en un aparato que confinaba al pez en un conducto circular (*arriba*); una célula fotoeléctrica registraba una "cuenta" de actividad cada vez que el pez interrumpía un haz de luz infrarroja. Puede que el reloj interno que gobierna esos ritmos se rija por las variaciones de la presión del agua que acompañan a la subida y el descenso diarios de la marea, pero no está todavía claro.

Tierras no tan raras

Las tierras raras, elementos de los que dependen la industria electrónica, la metalurgia y la óptica, no escasean en los minerales. Su dispar concentración revela el proceso geoquímico que conduce a la formación de los minerales

Gunter K. Muecke y Peter Möller

A pesar de su denominación genérica, las tierras raras no son raras ni tampoco tierras (óxidos metálicos). Son elementos metálicos y todos, salvo uno, más abundantes en la Tierra que el oro, la plata, el mercurio o el tungsteno. (En un primer momento se les consideró tierras raras porque fueron aislados en forma de óxido a partir de minerales insólitos.) La verdad es que las "tierras raras" son elementos omnipresentes, hallándose en pequeñas concentraciones en casi todos los minerales.

Extraer las tierras raras a partir de los minerales comunes resultaría prohibitivo. Mas, por fortuna para nosotros, existen algunos minerales menos corrientes cuya concentración de tierras raras, suficientemente alta, nos faculta para una obtención económica de dichos elementos, y decimos por fortuna porque algunos son componentes clave en la elaboración de numerosos productos modernos. El cerio y el erbio entran en la composición de aleaciones metálicas de altísimas prestaciones. El neodimio, holmio y disprosio son necesarios en ciertos tipos de cristales de láser. El samario es un componente esencial de los imanes permanentes más intensos que se conocen, que han abierto el camino para la creación de nuevos motores eléctricos. Las propiedades magnéticas del yterbio y del terbio se aprovechan en la fabricación de burbujas magnéticas y dispositivos óptico-magnéticos, que almacenan datos en ordenadores. El europio excita al fósforo rojo de las pantallas de los televisores en color. Quizá la aplicación más interesante de las tierras raras la encontremos en la elaboración de cerámicas que se vuelven superconductoras a temperaturas bastante altas. El lantano era un componente de estas cerámicas; los investigadores han comprobado que sustituyéndolo por gadolinio se presentaba el fenómeno de la superconductividad incluso a temperaturas más altas. Asimismo, algunas tierras raras catalizan el refinado del petróleo y regulan los índices de refracción de lentes de vidrio y fibras ópticas. (Hay, además, muchísimos productos de escaso refinamiento técnico e importancia menor fabricados con tierras raras. En aleación con el hierro, por ejemplo, se emplean para producir las piedras de encendedor.)

El hecho de que estos elementos no presenten una dispersión uniforme en la superficie de la Tierra constituye una ventaja para las compañías mineras, pero también para los geoquímicos. La concentración relativa de las tierras raras en los minerales refleja la interacción entre las singulares propiedades químicas de estos elementos y los diversos procesos que ocurren en el manto superior y en la corteza terrestre. De las conclusiones a que lleguen los especialistas dedicados al estudio del modelo de distribución de las tierras raras en los minerales sacarán provecho la geología y, en última instancia, la industria.

No sólo resulta impropia la denominación "tierras raras", sino que existe cierto desacuerdo acerca de los elementos exactos que engloba esa expresión. Para muchos químicos debieran incluirse el escandio, el ytrio y los lantánidos: los elementos con número atómico entre 57 y 71 [*véase la figura 2*]. Nuestro trabajo se centra específicamente en los lantánidos, aunque por conveniencia continuaremos usando también el término "tierras raras" para designar estos elementos. (Dejaremos de lado el prometio, ya que no presenta isótopos estables, ni se halla en la naturaleza.)

La confusión terminológica obedece, en parte, a la reactividad de estos elementos, que dificulta su aislamiento en formas puras, y a la semejanza de sus propiedades químicas, que entorpece su mutua separación. Si bien la primera descripción de un mineral insólito que contenía tierras raras apareció en 1788, hubo de transcurrir medio siglo hasta que el cirujano, químico y mineralogista sueco Carl Gustav Mosander demostró que las tierras aisladas de los minerales no eran en absoluto elementos, sino mezclas de óxidos elementales. El posterior aislamiento y caracterización de cada una de las tierras raras en su forma elemental constituyó un largo y tortuoso proceso que culminó en 1947, cuando se aisló el prometio a partir de los productos de fisión del uranio.

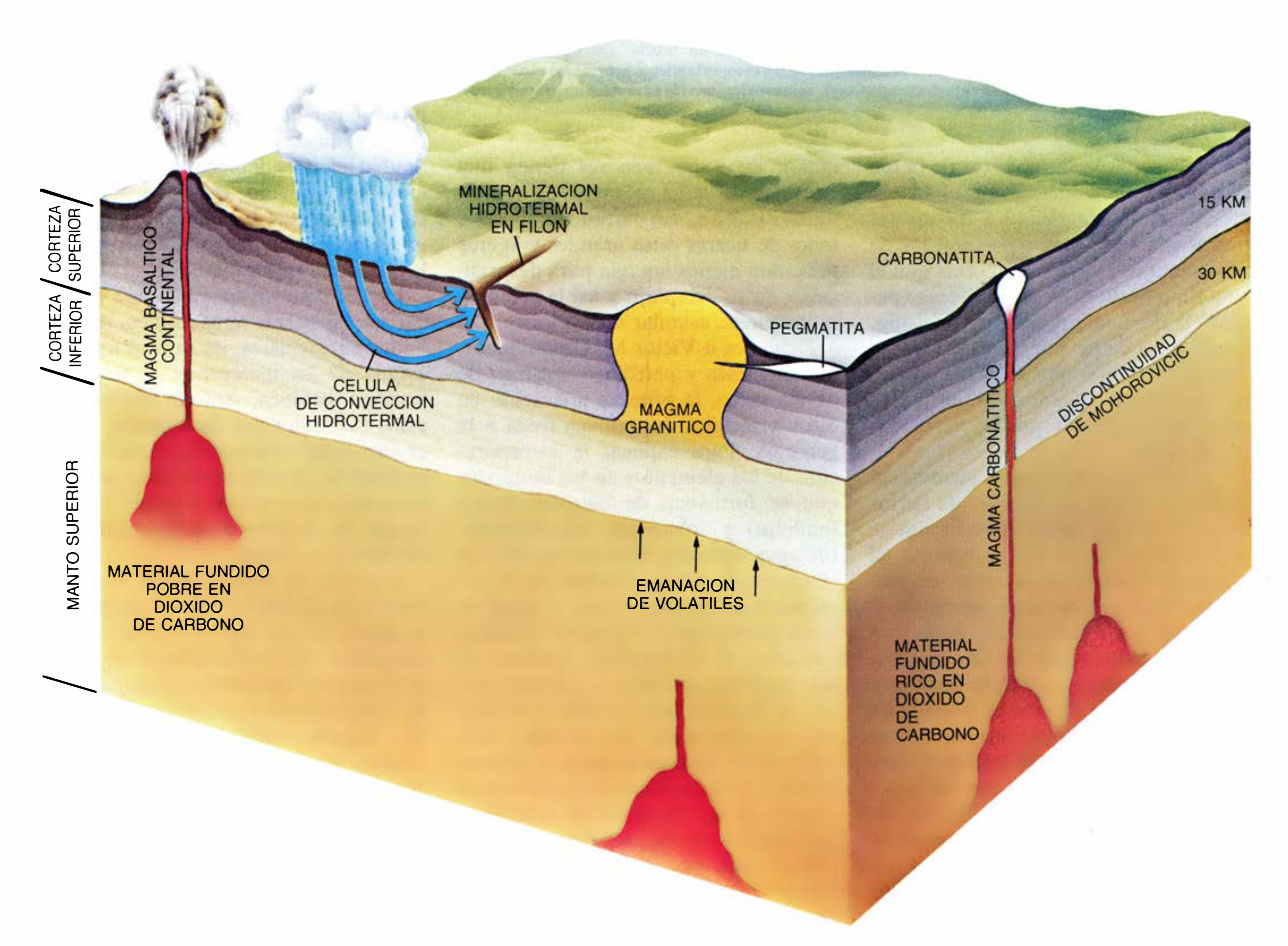
La coherencia química o semejanza entre las tierras raras nace de su estructura atómica. Podemos considerar el átomo como un núcleo cargado positivamente y rodeado por diversas "capas" de electrones (designadas por números) que, a su vez, se componen de "subcapas" (designadas por letras) correspondientes a los estados cuánticos permitidos de los electrones del átomo. Los electrones de valencia, o de enlace, se alojan en la capa más externa del átomo y determinan sus propiedades químicas. Los átomos colindantes de la tabla periódica suelen divergir no sólo en su carga nuclear, sino también en el tipo de electrones de valencia que posee cada uno. Ahora bien, los átomos de todas las tierras raras presentan el mismo número y tipo de electrones de valencia en su sexta capa, la más externa, con independencia de su número atómico. El incremento de carga positiva en el núcleo se compensa rellenando la subcapa f de la cuarta capa, que se halla parcialmente ocupada. Al permanecer inalterada la capa de electrones de valencia, todos los átomos de las tierras raras ofrecen unas propiedades químicas muy parecidas.

Los rasgos distintivos del comportamiento químico de cada una de las tierras raras provienen, en gran parte, del diferente tamaño atómico eficaz que exhiben cuando pierden tres electrones, convirtiéndose así en iones trivalentes. Debido al progresivo aumento de la fuerza de atracción entre la cre-

ciente carga positiva en el núcleo y la carga negativa cada vez mayor de la subcapa 4*f*, el tamaño de los iones trivalentes disminuye conforme aumenta el número atómico. El modelo del tamaño iónico presenta importantes excepciones a este comportamiento habitual cuando ciertas tierras raras adoptan estados iónicos "anómalos", distintos del estado trivalente normal. Bajo condiciones reductoras (en presencia de elementos que ceden electrones), el europio puede ganar un electrón y adquirir un estado divalente; bajo condiciones oxidantes (en presencia de oxígeno libre), el cerio puede perder un electrón y volverse tetravalente.

En una roca fundida o en soluciones acuosas calientes, esas diferencias de tamaño iónico determinan qué tierras raras se incorporarán, antes que otras, en los cristales formados al enfriarse el líquido. La razón estriba en que los átomos de las tierras raras no son iones libres, sino que se encuentran rodeados por otros iones, llamados ligandos, con los que forman complejos. El número de ligandos en un complejo, así como su disposición geométrica, depende de la concentración y del tipo de ligandos presentes en el líquido. Antes de su incorporación en un cristal, el complejo que contiene al ion de una tierra rara debe modificarse ligeramente en la superficie del cristal. En este proceso son críticas las condiciones electroquímicas en la interfase sólido-líquido. Una vez incorporado este complejo (y con él un ion de tierra rara) en la fina capa superficial, debe acomodarse y ajustarse en la estructura reticular de crecimiento del cristal. En el caso de que el complejo no fuera asimilable, el ion de tierra rara podrá tener cabida en el cristal en crecimiento, siempre y cuando el complejo pueda deshacerse y el ion quede libre en la superficie del cristal.

Fijémonos en el xenotimo y la monacita, dos minerales fosfatados. Ambos cristalizan a partir de materiales fundidos, de naturaleza química similar y portadores de tierras raras entre sus constituyentes menores. En la estructura cristalina del xenotimo sólo hay sitio para complejos de tierras raras que presenten como máximo ocho ligandos de oxígeno; por su parte, la estructura cristalina de la monacita acepta átomos de tierras raras rodeados por diez ligandos de oxígeno. Puesto que los iones de tierras raras más pequeños están rodeados por menos átomos de oxígeno, podrán aquellos ocupar los huecos menores de un cristal de xenotimo en crecimiento. En contraste, los iones de tierras raras mayores, rodeados por más átomos de oxígeno, pueden ocupar



1. PROCESOS GEOLOGICOS involucrados en la producción de minerales enriquecidos en tierras raras. Los magmas (roca fundida) pueden presentar altas concentraciones de estos elementos, en particular de los más ligeros (dotados de menor número atómico), si se han originado en las regiones profundas del manto superior ricas en dióxido de carbono. El magma puede ascender hasta la corteza y formar allí carbonatitas. El magma del manto producido más cerca de la corteza, desde donde el dióxido de carbono y otras sustancias volátiles han podido huir hacia la superficie de la Tierra, se hallan empobrecidos en tierras raras, por regla general. Los materiales corticales pueden también fundirse, dando lugar a magmas graníticos con un contenido en tierras raras más alto que el sólido original. Cuando este magma se enfría, los cristales incorporan preferentemente las tierras raras "pesadas" (las de mayor número atómico). El residuo líquido resultante de una cristalización generalizada puede, por tanto, quedar enriquecido en tierras raras ligeras. Finalmente, este residuo cristaliza en pegmatitas (rocas magmáticas silicatadas). Las tierras raras en soluciones hidrotermales, o sea, de agua caliente, se concentran a medida que la solución cristaliza. En este caso, sin embargo, son las tierras raras pesadas las que progresivamente se van acumulando en mayor cantidad en el residuo líquido.

NUMERO ATOMICO	ELEMENTOS		CONFIGURACION ELECTRONICA DE LAS CAPAS EXTERNAS 4 (s p d f: 2 6 10)	5 (s p d: 2 6)	6 (s)	RADIO IONICO (ANGSTROM) 1,0 1,1 1,2 1,3
57	LANTANO	La	0	1	2	
58	CERIO	Ce	1	1	2	
59	PRASEODIMIO	Pr	3	0	2	
60	NEODIMIO	Nd	4	0	2	
61	PROMECIO	Pm	5	0	2	
62	SAMARIO	Sm	6	0	2	
63	EUROPIO	Eu	7	0	2	
64	GALODINIO	Gd	7	1	2	
65	TERBIO	Tb	9	0	2	
66	DISPROSIO	Dy	10	0	2	
67	HOLMIO	Ho	11	0	2	
68	ERBIO	Er	12	0	2	
69	TULIO	Tm	13	0	2	
70	YTERBIO	Yb	14	0	2	
71	LUTECIO	Lu	14	1	2	

2. LAS TIERRAS RARAS incluyen los lantánidos: elementos con número atómico comprendido entre 57 y 71. Los átomos de todas estas tierras raras muestran un comportamiento químico muy similar, porque los electrones de valencia, o de enlace, de las capas exteriores tienen estados cuánticos similares (designados por las letras *s*, *p*, *d* o *f*). Aunque la configuración de los electrones de valencia no varía significativamente al crecer el número atómico, los iones (originados cuando el átomo pierde tres electrones) presentan un decrecimiento gradual y sistemático de su tamaño. (Como los iones que constituyen los cristales pueden representarse mediante esferas cargadas, a cada uno se le puede asignar un "radio" correspondiente a su tamaño.) Los iones de cerio y europio se desvían notablemente del comportamiento general del radio iónico cuando ganan o pierden respectivamente electrones (*rojo*), como suelen hacerlo en ambientes subterráneos.

los mayores espacios abiertos de la red cristalina de la monacita. Resultado de ello, la monacita tiende a incorporar tierras raras "ligeras", que son las de bajo número atómico, mientras que el xenotimo prefiere las tierras raras "pesadas", de número atómico elevado. La mayoría de los minerales presentan formas cristalinas que aceptan complejos de sólo seis oxígenos; evidencian así una intensa afinidad por las tierras raras pesadas.

Aunque en las soluciones acuosas calientes el tamaño de los iones de tierras raras determina también qué iones se incorporarán mejor en los cristales, el resultado final es el inverso: los elementos de tierras raras pequeños y pesados tienden a permanecer en la fase líquida, mientras que las tierras raras mayores y ligeras preferirán instalarse en los cristales. La razón es sencilla: en soluciones acuosas, los iones de tierras raras se hallan rodeados por moléculas de agua polarizadas, no por ligandos. La apretada envoltura de moléculas de agua sólo permite establecer contacto y formar enlaces de ligandos con las tierras raras a unos pocos iones cargados negativamente: hidroxilo (OH^-), fluoruro (F^-) o carbonato (CO_3^{2-}). La intensidad de estos enlaces depende de la densidad de carga del ion de tierra rara. Ahora bien, ocurre que en la mayoría de los casos, los iones de tierras raras adquieren idéntica carga, +3; por consiguiente, la densidad de carga de estos iones sólo será función de su tamaño: los iones menores tienen una densidad de carga más elevada que los iones mayores. En virtud de ello, los iones de tierras raras grandes y ligeros necesitan menos energía para desprenderse de su complejo y así la red cristalina puede asimilar dichos iones.

Debemos a Victor M. Goldschmidt, mineralogista y petrólogo noruego de origen suizo, la primera aplicación de estos principios de química física a la geología. Para explicar la incorporación de los elementos en los minerales que se formaban de magmas (rocas fundidas) y soluciones hidrotermales (de agua caliente), formuló en 1937 un conjunto de reglas basadas en la semejanza de tamaño iónico y carga de los elementos que integran los cristales. Las ideas de Goldschmidt pecaban de un simplismo excesivo y pasaban por alto la función que cumplía la formación de complejos. Los geólogos han comenzado hace muy poco a prestar atención a los avances realizados en el estudio de la formación de complejos para explicar el fraccionamiento de las tierras raras (su autosegregación en función de su número atómico), tanto en el manto como en la corteza terrestre, partiendo de la concentración inicial de estos elementos en el momento de la formación de la Tierra, hace unos 4500 millones de años.

La abundancia de tierras raras en la Tierra primitiva se infiere de la composición elemental de un grupo especial de meteoritos: las condritas carbonáceas. Tierra y condritas se formaron por un proceso de condensación y acreción a partir del material de una nube primigenia de gas y polvo. La sospecha acerca de su origen común surgió a raíz de las mediciones efectuadas por Gerald J. Wasserburg y Donald J. DePaolo, del Instituto de Tecnología de California, en 1976.

Wasserburg y DePaolo midieron, en meteoritos y rocas terrestres, la cantidad de samario 147 radiactivo (^{147}Sm) y su producto derivado, el neodimio 143 (^{143}Nd). En virtud de la desintegración radiactiva del samario 147, la cantidad de neodimio 143 ha aumentado continuamente a lo largo del tiempo en relación con los isótopos estables del neodimio, tales como el neodimio 144, a un ritmo determinado por la razón entre las concentraciones originales de samario y neodimio y por la vida media del samario 147 (cifrada en torno a 100.000 millones de años). Wasserburg y DePaolo demostraron que nuestro planeta y los meteoritos condríticos presentaban la misma relación ^{143}Nd/^{144}Nd y, en consecuencia, los cocientes Sm/Nd iniciales debían ser similares. Se cree, sin embargo, que las concentraciones absolutas de samario y neodimio en el manto original pudieran doblar las halladas en los meteoritos.

Ese enfoque se apoya en una observación: las tierras raras residen, de manera casi exclusiva, en la fracción silicatada de los meteoritos, y no en la fracción metálica. Ante la afinidad de estos elementos por los silicatos, parece razonable concluir que fueron acumulándose (y concentrándose paulatinamente) en el manto original, en tanto que los metales emigraban hacia el núcleo de la Tierra.

Una vez el manto recién formado elevó el gradiente térmico regional hasta producir una fusión parcial de los materiales, se concentraron el samario, el neodimio y las demás tierras raras en las capas corticales externas. ¿Por qué? El líquido inicialmente exudado —como resultado del calentamiento— por los minerales con tierras raras es propenso a incorporar las tierras raras ligeras, que forman los complejos más estables en el estado líquido. Tan pronto como el material del joven manto empezó a fundirse, las tierras raras sufrieron una selección y los elementos de mayor tamaño y más ligeros (samario y neodimio) se incorporaron en el material fundido, antes que los elementos pesados y menores. Siendo los sólidos, en general, más densos que los líquidos, aquellos primeros materiales fundidos tenían una densidad menor

que el material sólido del manto (del que procedían) y ascendieron hacia la superficie de la Tierra, formando así la corteza primitiva.

Este tipo de segregación elemental estaba ya bastante avanzada hace 3800 millones de años, durante la era Arcaica, cuando se depositaron los sedimentos que formaron las rocas terrestres más antiguas que se conocen. Tales rocas ofrecen una estimación fiable de las concentraciones de tierras raras en aquellos tiempos, ya que la solubilidad de estos elementos en las aguas superficiales es bajísima y no son fácilmente separables del mineral huésped por los procesos de meteorización, erosión, transporte y deposición. Estas rocas revelan que la corteza superior arcaica quedó enriquecida respecto al manto primitivo en un factor de 25 para el lantano; este factor decrece suavemente en función del número atómico hasta un valor de 5 para el lutecio.

Se cree que la separación de la corteza continental a partir del manto primitivo alcanzó su punto máximo entre 2000 y 2500 millones de años atrás. Un 75 por ciento del volumen de la corteza continental actual debió de formarse por entonces. La extracción de semejante volumen de material enriquecido en tierras raras dejó a ciertas regiones del manto superior empobrecidas en tierras raras ligeras. Al ser el neodimio más ligero que el samario, la relación Sm/Nd (que determina el ritmo de incremento del cociente ^{143}Nd/^{144}Nd observable) resultó aumentada en el manto empobrecido en grado suficiente como para marcarlo con una caracterización isotópica distintiva. La alta relación ^{143}Nd/^{144}Nd del material volcánico registrada a lo largo de las dorsales centro-oceánicas sugiere que el manto debió constituir una fuente de materiales que probablemente estuviera implicada en los primeros estadios de la formación continental.

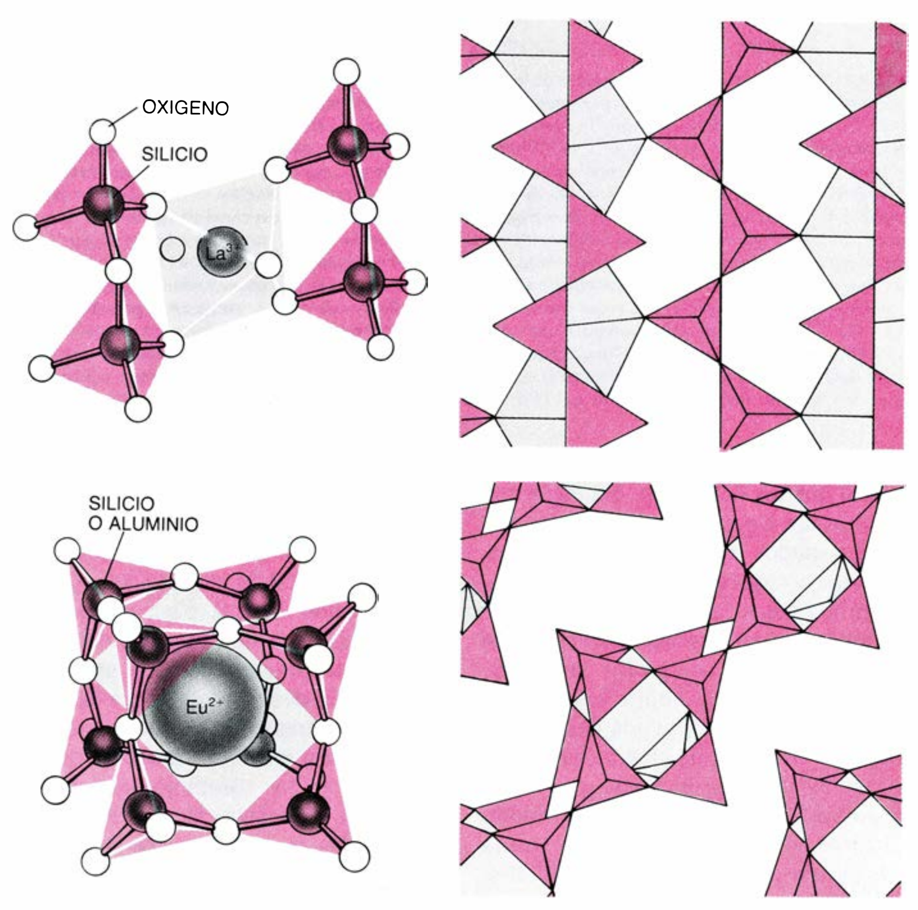
A pesar del empobrecimiento general en tierras raras ligeras que sufrió este manto inicial, algunos magmas del manto extruidos a través de la corteza poseen, no obstante, elevadas concentraciones de tierras raras. ¿Cómo explicarlo? La respuesta estriba en que los minerales cuyos puntos de fusión sean elevados pueden cristalizar a partir de un magma del manto y se separan físicamente del mismo mediante deposición gravitacional o por flotación. Como las tierras raras (las ligeras, en particular) tienden a permanecer en la fase líquida, el enriquecimiento en ellas por parte del magma se va produciendo con el avance del proceso de cristalización. De hecho una cristalización generalizada puede resultar en una concentración cien veces mayor de tierras raras en los magmas del manto. No obstante, la concentración de tierras raras de las rocas formadas a partir de tales magmas (que pueden encontrarse en islas volcánicas y en fosas tectónicas continentales) es todavía bastante menor que la exigida para su explotación minera.

Bajo condiciones favorables los magmas del manto se hallan sujetos a otra fuente de enriquecimiento en tierras raras que, por fortuna para nosotros, da lugar a la formación de yacimientos económicamente rentables. Estas condiciones corresponden a la formación de carbonatitas (rocas carbonatadas ígneas). Los magmas carbonatíticos se originan cuando las rocas del manto funden en presencia de grandes cantidades de dióxido de carbono. En ellos, las tierras raras forman fuertes complejos carbonatados, donde los elementos ligeros constituyan complejos más fuertes que los elementos pesados.

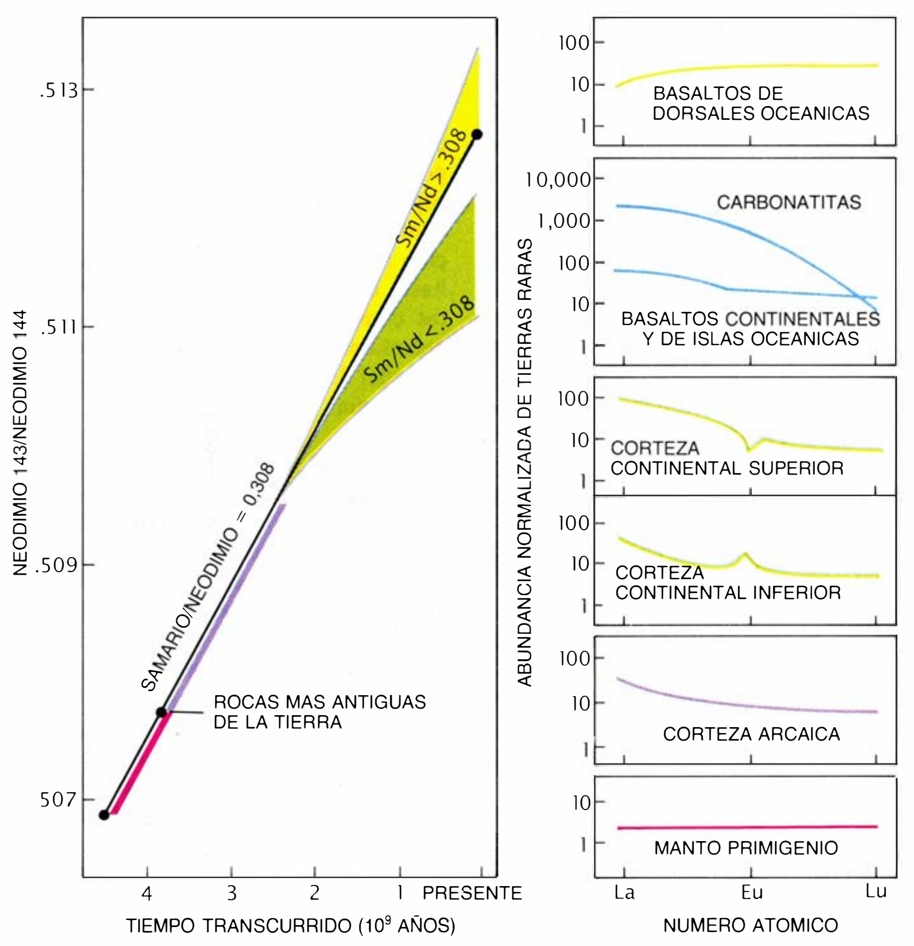
En los magmas carbonatíticos, las tierras raras pueden alcanzar nivel suficiente para cristalizar en bastnaesita y parisita. En esos minerales ricos en tierras raras, la roca formada al enfriarse el magma puede presentar unas proporciones de tierras raras 10.000 veces superiores a los del magma primitivo y contener minerales con una concentración total en óxidos de tierras raras de hasta un 60 por ciento. Las carbonatitas constituyen el origen principal de yacimientos de tierras raras, como es el caso del depósito de Mountain Pass, en California.

A medida que la corteza continental crecía en grosor, la temperatura de sus capas inferiores aumentó hasta provocar fundiciones regionales. Andando el tiempo, el proceso de fundición y la redistribución subsiguiente del material líquido por el interior de la corteza se convirtieron en el proceso geológico de fraccionamiento dominante, mayor incluso que la acumulación de magmas derivados del manto.

Los magmas producidos en la corteza son bastante más ricos en sílice (óxi-



3. IONES DE TIERRAS RARAS en materiales silicatados fundidos. Se hallan rodeados por otros iones, llamados ligandos, y forman un complejo. La estructura de un complejo de tierra rara depende de la concentración y del tipo de ligandos presentes, así como del tamaño del ion de tierra rara. Estos elementos se asimilan mejor en un cristal que esté creciendo en un líquido, si acontece que su complejo correspondiente posee una estructura congruente con la estructura de la red básica del cristal; de otro modo, el complejo debe desarmarse. Por esta razón, el ion lantano (dotado de una carga de +3) tiende a incorporarse en minerales silicatados que contengan hierro y magnesio (*arriba*), mientras que el ion europio (dotado de una carga de +2, y que alcanza un tamaño mucho mayor) se incorpora preferentemente en los feldespatos (*abajo*).



4. FRACCIONAMIENTO o segregación de los elementos de acuerdo con su número atómico. Es fruto de la evolución geológica de la Tierra, como viene indicado por la razón entre neodimio 143 (^{143}Nd) y el neodimio 144 (^{144}Nd) en varios tipos de rocas (*izquierda*). Como el neodimio 143 se produce por desintegración radiactiva del samario 147, el cociente ^{143}Nd/^{144}Nd refleja la relación entre samario y neodimio. Parece ser que la relación Sm/Nd en la Tierra primitiva era de 0,308, puesto que ésa es la observada en los meteoritos condríticos. La concentración de cada una de las tierras raras en estos meteoritos se toma de valor base a partir del cual se calculan los factores de enriquecimiento, conocidos también como abundancias normalizadas. La curva que relaciona las abundancias normalizadas de las tierras raras (*derecha*) se supone horizontal para el manto original, pues careció de la posibilidad de fraccionarse. Las rocas formadas en la corteza arcaica, que son las más antiguas conocidas en la Tierra, muestran ya cierto enriquecimiento en tierras raras —sobre todo en las ligeras—. Las rocas con menos de 2500 millones de años de antigüedad presentan unos cocientes ^{143}Nd/^{144}Nd que dan a entender unas relaciones Sm/Nd muy distintas; reflejan así que la fusión y cristalización que condujeron a su formación provocaron su enriquecimiento o empobrecimiento en tierras raras ligeras. La peculiar discrepancia en la concentración de europio en las rocas de la corteza continental inferior y superior deriva del hecho de que la primera de estas dos retiene preferentemente a este elemento.

do de silicio) y alúmina (óxido de aluminio) que los del manto. En estos materiales, los iones de tierras raras se hallan asociados a complejos de silicio, aluminio y oxígeno. Los minerales aluminosilicatados que cristalicen a partir de ese material fundido incorporarán estos grupos de complejos en su estructura cristalina. Ahora bien, como consecuencia de la elevada carga eléctrica de los iones de tierras raras, un complejo aluminosilicatado que contenga uno de ellos quedará deformado y lo más verosímil será que no pueda constituirse en una pieza más del cristal. Vale decir, los complejos que posean tierras raras tenderán a acumularse en la fase líquida del material fundido de la corteza durante el proceso de cristalización.

A pesar de ello, un ion de tierra rara puede también incorporarse en un cristal de aluminosilicato si antes se desmonta el complejo. Ahora bien, los complejos más deformados presentan enlaces más débiles; se necesitará, pues, menos energía para romperlos. La cuantía de la deformación del complejo viene determinada, en gran medida, por la densidad de carga del ion; las tierras raras pesadas (de menor tamaño iónico) producen mayores deformaciones en los complejos que las ligeras. En consecuencia, las tierras raras pesadas se incorporarán mejor en una estructura cristalina en formación, dejando al material fundido residual enriquecido en tierras raras ligeras.

Si el material fundido de la corteza, previamente enriquecido en tierras raras, cristaliza, el líquido residual queda fuertemente enriquecido con tierras raras ligeras, así como en agua y flúor, pues éstos tampoco se incorporan fácilmente en los cristales. Cuando finalmente cristaliza el líquido residual, lo hace en formaciones relativamente pequeñas de rocas con tamaño de grano muy grueso, conocidas por pegmatitas; éstas pueden contener acumulaciones sustanciales de minerales de tierras raras y crean así yacimientos de tierras raras de interés industrial —particularmente de las más ligeras—. En el distrito de South Platte, Colorado, hay un depósito de ésos.

Stuart Ross Taylor y Scott M. McLennan, de la Universidad Nacional de Australia, han demostrado que los sedimentos con edades superiores a los 2500 millones de años, que representan una muestra de la corteza continental arcaica, son más pobres en tierras raras que sus equivalentes más jóvenes. Los más jóvenes ofrecen, sin embargo, una pequeña escasez, muy clara, en europio. Tal discrepancia tiene que ver con la plagioclasa; este feldespato, rico en calcio, constituye un residuo habitual de los materiales fundidos de la corteza y retiene preferentemente el europio en su forma anómala divalente. Como resultado, la fusión de materiales intracorticales conduce a un enriquecimiento de la corteza superior en tierras raras —sobre todo en las más ligeras—, aunque con un empobrecimiento relativo de europio.

Una vez éstas han ascendido hasta la corteza continental superior, los magmas, líquidos o solidificados, podrían interaccionar con las aguas subterráneas calientes y producir soluciones hidrotermales. Dichas soluciones cristalizan formando minerales cuyos contenidos en tierras raras revelan la fuente original de estos elementos y llevan el marchamo de las condiciones existentes durante su deposición. (La interpretación de estos datos se mueve en el terreno de la provisionalidad, pues la circulación de las soluciones hidrotermales por el subsuelo ofrece múltiples vías de modificar su composición química a medida que interaccionan con las rocas que las rodean.)

Las tierras raras se depositan de manera eficaz en minerales de calcio, así fluorita y calcita, porque los iones trivalentes de tierras raras tienden a sustituir el calcio. Las tierras raras pesadas forman los complejos más estables en las soluciones acuosas; por ello, las tierras raras ligeras cuentan con una posibilidad algo mayor de incorporarse en los cristales que crecen en las soluciones hidrotermales. Conforme van cris-

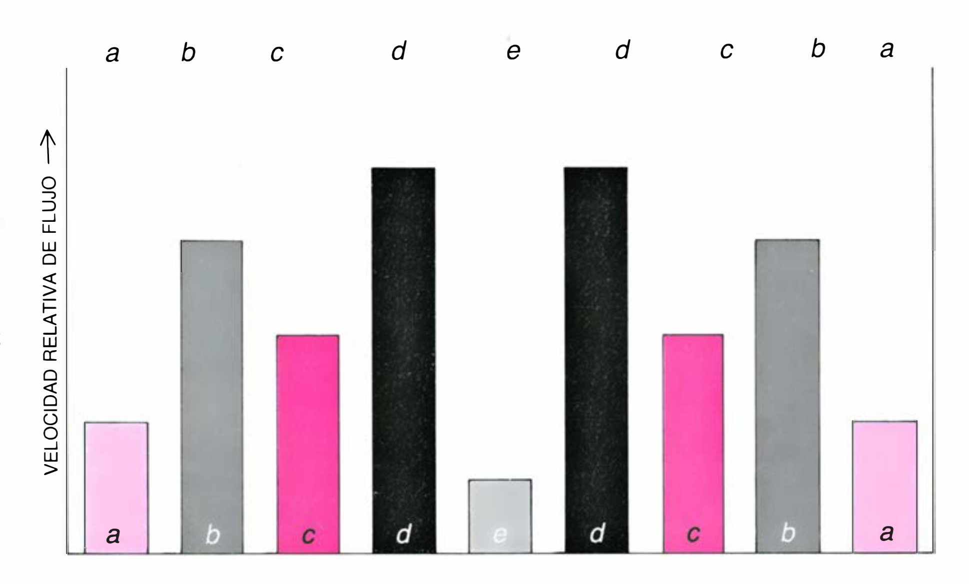
talizando, estas soluciones dan lugar a minerales con proporciones progresivamente más altas de tierras raras pesadas. Pero los minerales de calcio son tan efectivos a la hora de incorporar iones trivalentes de tierras raras de cualquier tamaño que no llega casi nunca a producirse la acumulación de tierras raras pesadas hasta una concentración tal que pudiera permitir la cristalización de sus propios minerales. En consecuencia, de los depósitos hidrotermales sólo podrán recuperarse las tierras raras en forma de productos secundarios.

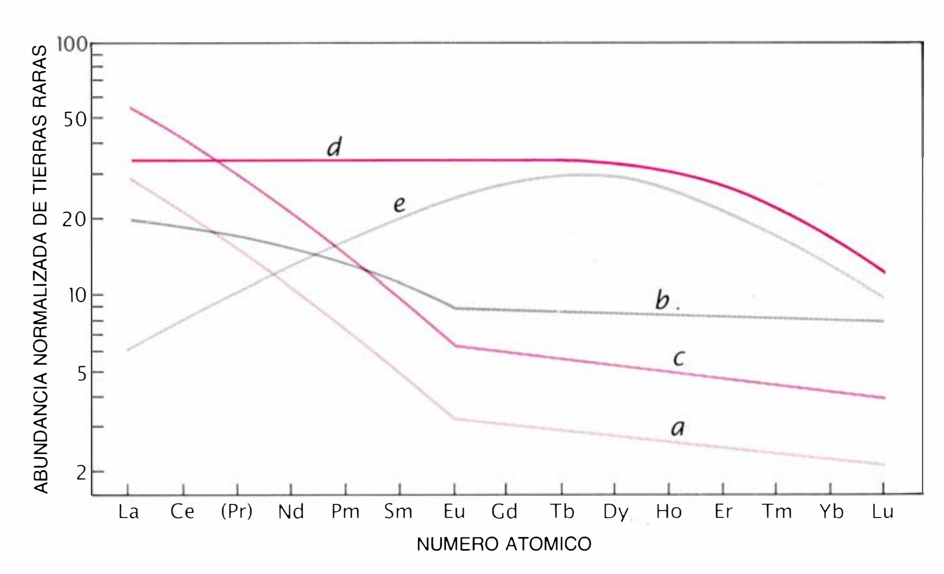
Cuando se compara el papel que tiene la formación de complejos de tierras raras en soluciones hidrotermales con la de los magmas fundidos, queda patente que siguen trayectorias opuestas. En los sistemas magmáticos, las tierras raras ligeras muestran una acusada tendencia a permanecer en la fase líquida, mientras que en las soluciones hidrotermales son las tierras raras pesadas las que presentan tal tendencia. Vistas en el contexto del tiempo geológico, esas tendencias antagónicas provocan una caída del fraccionamiento de tierras raras en la corteza terrestre.

Estos procesos opuestos de fraccionamiento explican la relativa escasez de depósitos de tierras raras, a pesar de que éstas no lo sean en su conjunto. Hay menos plomo en la Tierra que tierras raras (tomadas en grupo), y no obstante sus yacimientos forman ricos filones; la razón estriba en que, en el caso del plomo, el fraccionamiento magmático refuerza el hidrotermal.

El estudio de la distribución de tierras raras en los minerales ha demostrado, sin embargo, que bajo circunstancias favorables (que se dan cuando uno de los tipos domina: el magmático o el hidrotermal) la concentración final puede alcanzar un volumen suficiente para formar depósitos explotables de estos elementos. Además, estas investigaciones arrojan cierta luz sobre los procesos de intercambio de elementos entre los minerales y los líquidos, ya sean éstos soluciones magmáticas o hidrotermales. Si pensamos que los geoquímicos suelen hallarse de acuerdo en considerar a éstos los procesos principales a través de los cuales se concentraron la mayoría de los elementos en las rocas de la corteza y del manto desde las épocas primitivas, el estudio de la distribución de las tierras raras en los minerales ayudará a asegurar la continuidad del suministro de minerales —y no sólo de yacimientos de tierras raras— para las generaciones futuras.







5. HISTORIA DE UNA MINERALIZACION HIDROTERMAL contada a través de un diagrama de concentraciones de tierras raras en las bandas simétricas de fluorita que tapizan paredes de una fisura de la roca (*arriba*). En contraste con la formación de minerales magmáticos, las tierras raras pesadas y no las ligeras quedan retenidas en la fase líquida. Por eso, a medida que la solución hidrotermal cristaliza, el residuo líquido se va enriqueciendo progresivamente en tierras raras pesadas. Las bandas de fluorita reflejan este comportamiento, el cual viene condicionado por la velocidad de flujo de la solución (*centro*). Las bandas exteriores, que fueron las primeras en formarse, presentan una concentración de tierras raras ligeras más alta que de elementos pesados, tal como puede observarse en la gráfica de abundancias normalizadas (*abajo*). A su vez, las tierras raras pesadas se incorporan preferentemente en las bandas de fluorita del interior.

Arte, ilusión y sistema visual

Forma, color e información espacial se procesan por vías cerebrales independientes. Ello explica que ciertas imágenes produzcan efectos visuales sorprendentes

Margaret S. Livingstone

La visión es algo mucho más complicado de lo que la mayoría de la gente cree. En estos tiempos del vídeo y de la televisión resulta tentador equiparar la visión a una especie de toma de imágenes, cuando lo cierto es que las cámaras sólo pueden registrar lo que enfocan, pero no pueden interpretar ni identificar las imágenes que crean. Ningún videosistema ni cámara computarizada, por refinados que se supongan, iguala la capacidad del sistema visual humano de dar sentido a una infinita variedad de imágenes. Ese poder se basa en la capacidad del cerebro para procesar simultáneamente ingentes cantidades de información.

Recientes descubrimientos, algunos de ellos logrados por mi colega David H. Hubel y por mí, parecen indicar que las señales visuales no son procesadas por un único sistema jerárquico, sino que pasan, al menos, por tres sistemas cerebrales de procesamiento, cada uno de los cuales desempeña una función distinta. Según parece, un sistema procesa la información relativa a la percepción de la forma, otro la que atañe al color y, un tercero, la pertinente al movimiento, la localización y la organización espacial. Es, pues, probable que algunos de los efectos visuales creados por artistas y diseñadores logren su acción por ser analizada de ese modo la información lumínica.

La noción de que el sistema visual procesa la información por varias vías separadas dista mucho de ser novedosa; su ocurrencia quizá deba datarse a mediados del siglo XIX, cuando los científicos observaron que el nervio óptico se subdividía en varias ramificaciones al alejarse del ojo. Tal vez parezca extraño concebir la visión como un proceso dividido en muchas partes y no unitario —extraño pensar que la percepción de la forma de un objeto, la de su color y la de dónde está y cómo se mueve se procesen en diferentes partes del cerebro—; sin embargo, estudios anatómicos, fisiológicos y psicológicos indican convincentemente que tal es el caso. El que la forma de un objeto, su color, su posición y movimiento parezcan unificados aunque cada componente se analice por separado puede compararse con la experiencia de oír a alguien que habla: oímos la voz de esa persona y vemos el movimiento de sus labios sin percatarnos de que una percepción se procesa independientemente de la otra.

El proceso visual comienza cuando la luz atraviesa el cristalino y alcanza la retina, delgada capa de tejido nervioso altamente especializado situada en la parte posterior e interna del globo ocular. Allí, la luz incide en unas células fotorreceptoras especiales, denominadas conos y bastoncillos, y se convierte en señales eléctricas.

Los bastoncillos son más sensibles a la luz que los conos y responden sólo a niveles lumínicos muy bajos. Los conos, que operan en niveles lumínicos más altos, pueden clasificarse en tres tipos, que contienen diferentes pigmentos (moléculas fotoabsorbentes). Los pigmentos de los conos absorben la luz de una amplia gama del espectro visible, pero cada tipo de pigmento presenta máxima sensibilidad a cierta parte del espectro. Un tipo de conos responde más a las longitudes de onda cortas (sectores azul y verde del espectro), el segundo tipo a las ondas de longitud media (luz verde) y el tercero a las de longitudes mayores (luces amarilla, anaranjada y roja).

En las fases subsiguientes del análisis del color se aumenta la selectividad cromática por comparación, mediante sustracciones, de las señales procedentes de los tres tipos de conos. Al ser proporcional a la intensidad lumínica sobre una franja bastante amplia de longitudes de onda, el vigor de esa señal no dirá gran cosa acerca del color de la luz, pero sí lo hará la comparación de las señales recibidas de dos tipos diferentes de conos. Por ejemplo, cuando las señales, intensas, de los conos del rojo contrastan con las de los conos del verde y del azul, por ser éstas más débiles, se ve rojo; si las señales procedentes de los conos del rojo y del verde son iguales y las que dan los conos del azul son débiles, la luz se verá amarilla, y así sucesivamente. La comparación entre las longitudes de onda corresponde a neuronas cuyo ritmo de señalización lo aceleran las señales de un tipo de conos y lo retardan las de otro tipo. El efecto resultante es, en esencia, una sustracción entre los conos de un tipo y los del otro.

Si los niveles lumínicos son demasiado bajos para que puedan detectarlos los conos, como ocurre de noche, reciben el estímulo los bastoncillos, más sensibles. Pero, no disponiendo los humanos más que de un solo tipo de bastoncillos y no poder compararse las diferentes longitudes de onda, la oscuridad nos deja ciegos ante los colores.

Antes de salir del ojo y entrar en el cerebro, las señales eléctricas provenientes de las células fotorreceptoras se procesan en una segunda capa de neuronas y, a continuación, se transmiten a un estrato interior de la retina constituido por las denominadas células ganglionares [véase "Arquitectura funcional de la retina", por Richard H. Masland; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 1987]. El estrato de las células ganglionares representa la primera subdivisión importante de la senda visual. Contiene, entremezclados, dos tipos de

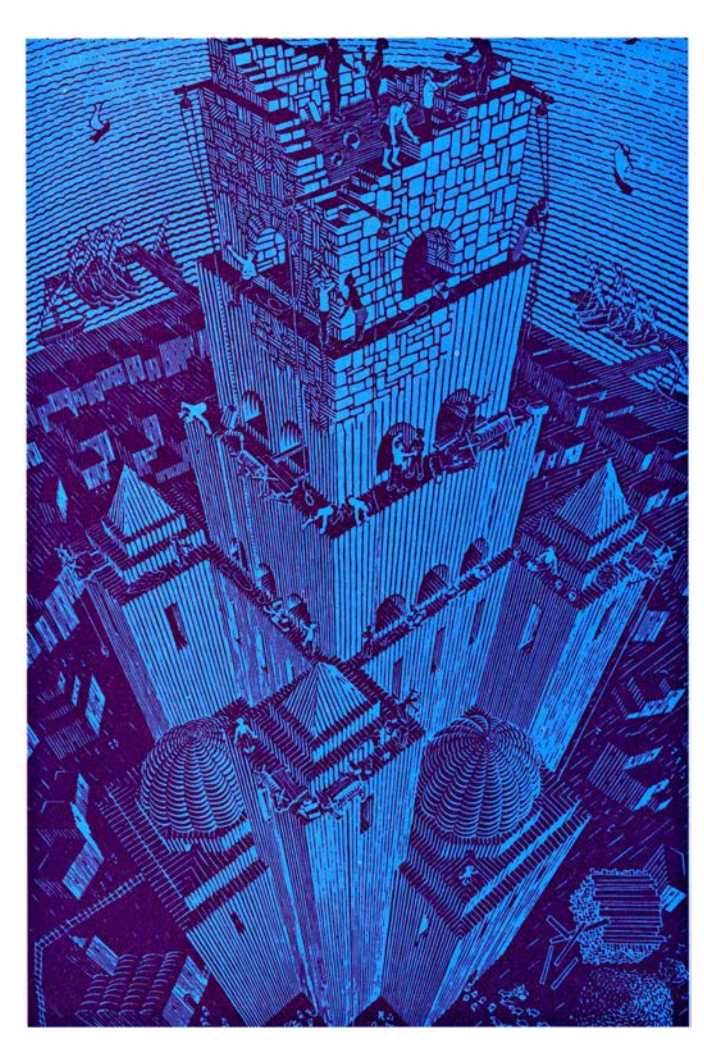
células que difieren por su tamaño (grandes y pequeñas) y por el modo de procesar la información recibida de los conos: las células grandes no distinguen entre las señales procedentes de los diversos tipos de conos, sino que simplemente suman la información que reciben de los tres tipos. Puesto que carecen de selectividad cromática, puede pensarse que son ciegas al color.

Las células ganglionares pequeñas sí distinguen los tres tipos de conos y, de hecho, sustraen la información que reciben de éstos. Ello las capacita para dar información cromática. Por ejemplo, una célula ganglionar rojo-menos-verde responderá sólo a la luz roja, aunque pueda recibir señales de varios tipos de conos. De ese modo, las señales que emiten estas pequeñas células ganglionares son más selectivas al color que las que ellas recibieron de los conos.

Las células ganglionares transmiten sus señales, a través del nervio óptico, desde el ojo hasta los cuerpos geniculados laterales, dos grupos de neuronas, del tamaño de cacahuetes, situados en el interior del cerebro. Los cuerpos geniculados laterales, lo mismo que la capa de células ganglionares, constan de dos clases de neuronas, que difieren entre sí tanto por su tamaño como por el tipo de información que suministran. Sin embargo, a diferencia de las de la capa ganglionar de la retina, estas dos clases de células no están entremezcladas, sino dispuestas en subdivisiones separadas en el espacio. La porción de células pequeñas (parvocelular) del cuerpo geniculado recibe señales de las células ganglionares pequeñas, mientras que la región de células grandes (magnocelular) las recibe de las células ganglionares grandes.

Investigaciones realizadas en varios laboratorios indican que esas dos sendas, llamadas parvosistema y magnosistema, se diferencian no sólo por su cromoselectividad, sino también por su sensibilidad a los contrastes lumínicos, su resolución temporal y su agudeza. El magnosistema es más sensible a los contrastes de intensidad lumínica, más rápido en sus respuestas y menos agudo que el parvosistema. Tan notables diferencias en las propiedades de la respuesta visual de las dos subdivisiones parecen sugerir que éstas desempeñan funciones de procesamiento enteramente distintas, mas para entenderlas es preciso considerarlas en el contexto de los niveles superiores del sistema visual.

Desde los cuerpos geniculados laterales pasan las señales nerviosas a la primera área visual del córtex, área visual 1. Se trata de una lámina plegada de neuronas, del tamaño de una tarjeta de crédito (pero el triple de gruesa), situada en la parte posterior del cerebro. La senda que siguen los impulsos eléctricos puede rastrearse hasta el estrato medio del área visual 1, donde se man-

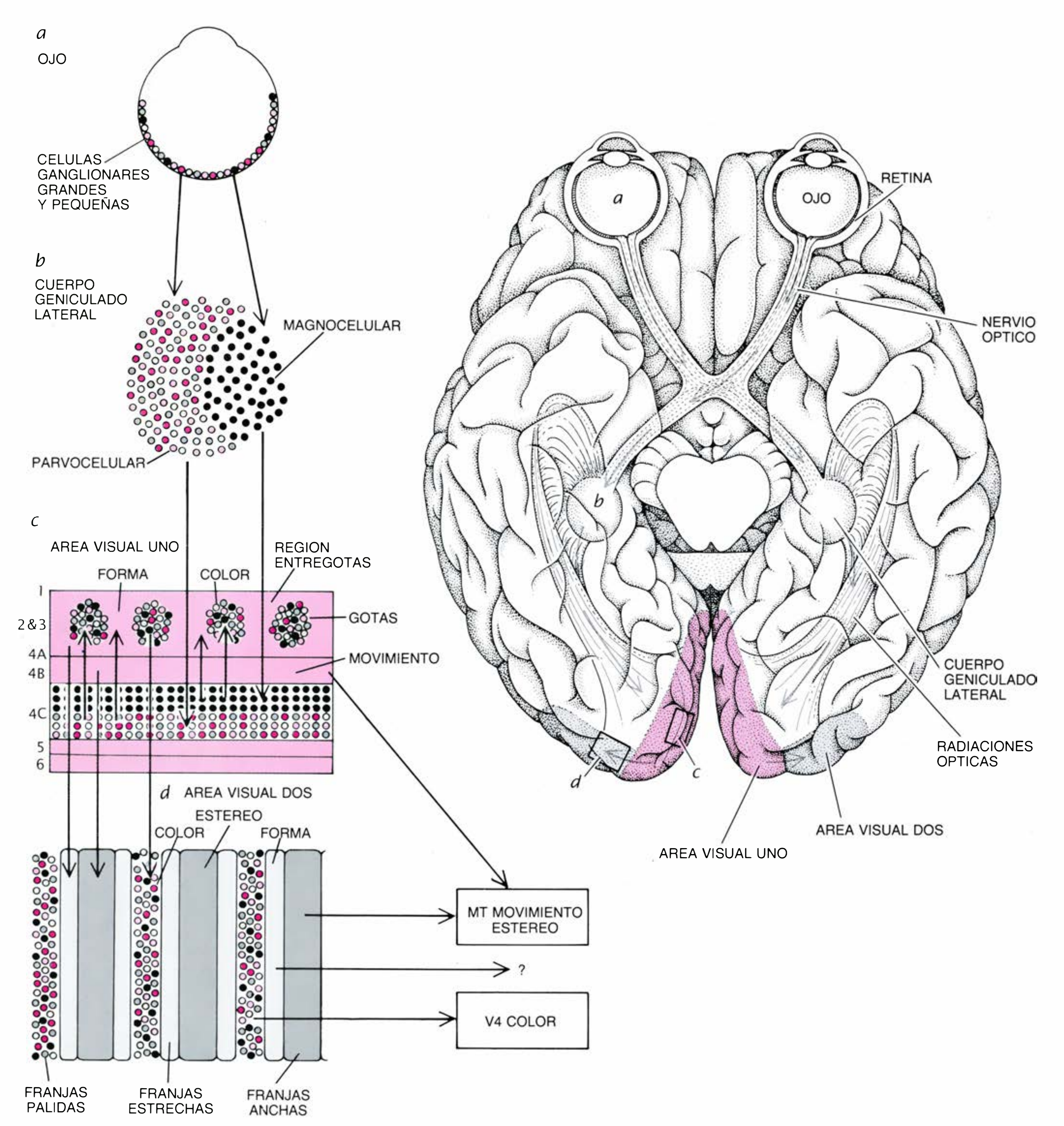




1. LA TORRE DE BABEL, de M. C. Escher, patentiza el efecto que produce en la percepción de la profundidad el contraste de las intensidades luminosas. Los colores que exhiben grados de luminosidad distintos, en este caso el azul más claro y más oscuro (*izquierda*), crean la percepción de una imagen marcadamente tridimensional. Pero si se remplaza el azul oscuro (*derecha*) por un verde, cuya luminosidad es afín a la del azul claro, se anula el efecto tridimensional y se dificulta la visión de la imagen. Para comprobar que ambas imágenes son idénticas, míreselas a través de un vidrio o un plástico de color azul.

tiene la separación de la información visual. Las señales procedentes del magnosistema se encauzan hasta la mitad superior de este estrato y, las procedentes del parvosistema, hasta la mitad inferior.

Se ha aclarado recientemente la fase que sigue a esta llamativa separación funcional. Los investigadores advirtieron que la información debía procesarse por rutas distintas en estadios cerebrales superiores, pues se había descubierto la separación de las diferentes funciones visuales en regiones situadas fuera del área visual 1. Así, Semir Zeki, del University College de Londres, encontró en el lóbulo temporal medio de los monos un área en la que había una gran proporción de células sensibles al movimiento o a la profundidad estereoscópica. También halló



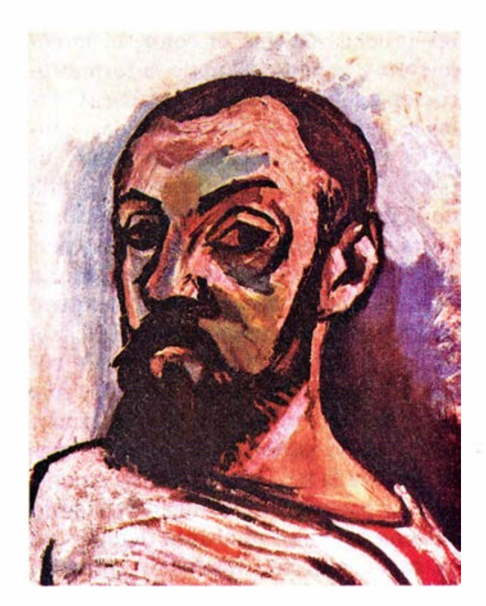
2. SISTEMA VISUAL HUMANO, que consta de tres sendas o vías distintas. La luz que entra en el ojo incide en la retina (*a*), donde la captan las células fotorreceptoras, que la convierten en impulsos eléctricos que recorren diversos estratos retinianos y van al cerebro a través del nervio óptico. La primera división del procesamiento de la información se produce en los cuerpos geniculados laterales (*b*), donde las pequeñas células del parvosistema transmiten información sobre contrastes de colores y, las células grandes del magnosistema, información sobre contrastes de luminosidad. Desde las células del magnosistema la información se envía a la capa 4B del área visual 1 (*c*) y después a las franjas espesas del área visual 2 (*d*). En ella se analizan las señales para extraer información sobre el movimiento y la profundidad. La señal procedente del parvosistema se dirige a las "entregotas" del área visual 1 y luego a las franjas pálidas del área visual 2, donde se analiza la forma. Las entradas procedentes de los sistemas parvo y magno se reúnen y combinan en las "gotas", donde se efectúa su procesamiento del color y de la intensidad luminosa. A continuación, la carga informativa pasa a las franjas delgadas del área visual 2, y, de ésta, a la 4.

otra, denominada área visual 4, que parecía estar selectivamente implicada en la percepción del color. Hasta hace poco se desconocía la relación entre la separación funcional de estas áreas visuales superiores y las subdivisiones de los cuerpos geniculados. La investigación que Hubel y yo hemos llevado a cabo en estos niveles intermedios nos ha permitido completar en cierto sentido las piezas del rompecabezas.

En 1978, Margaret Wong-Riley, de la Universidad de California en San Francisco, descubrió que, coloreando el área visual 1 con una enzima mitocóndrica, la citocromo oxidasa, aparecía en sus estratos superiores un delicado dibujo de zonas oscuras y claras. Las oscuras venían a ser ovoides ligeramente irregulares, de unos 0,2 milímetros de diámetro, y dibujaban una suerte de mosaico semirregular. Decidimos llamar a los ovoides "gotas" (por su forma) y al área más clara que los rodeaba "entregotas". Identificadas esas subdivisiones, pudimos ya fijarnos en las conexiones y propiedades de respuesta de cada una de ellas. Las dos vías que se distinguían en los niveles inferiores parecían reorganizarse, llegadas a este estadio, en tres subdivisiones: las entregotas recibían entradas del parvosistema, el estrato 4B del magnosistema y las gotas de ambos.

Comenzamos examinando la respuesta visual de las células en las tres subdivisiones del área visual 1; indagamos qué variables de estímulo resultaban más importantes en cada una de ellas. Medimos las respuestas selectivas de las diferentes neuronas a la forma, a la posición, a la distancia, al movimiento, al color, a la luminosidad y al tamaño; hallamos que las diferencias entre esas neuronas eran drásticas. Las gotas contenían células altamente selectivas para el color o la luminosidad, pero en modo alguno para la forma o el movimiento.

Por ejemplo, una célula de la entregota quizá respondiera ante una barra vertical sin tener en cuenta cómo se movía o si era negra, blanca o coloreada (el único criterio era la verticalidad de la barra); esa misma célula no respondía a barras orientadas en cualquier otra dirección. Las células del estrato 4B tampoco eran selectivas al color, pero sí a la orientación y al movimiento; una célula de ese sistema, por ejemplo, respondía a barras horizontales que se ascendían o a barras verticales que se movían horizontalmente, pero no a ambas.




3. LAS SOMBRAS pueden tener cualquier color; basta con que sean más oscuras que el resto de la superficie para que produzcan la sensación de profundidad. Así lo demuestra esta reproducción de un autorretrato de Henri Matisse. Resultan muy peculiares los tonos verdosos empleados por el artista para sombrear el rostro (*izquierda*), pero el efecto tridimensional que producen parece normal. En la fotografía en blanco y negro de la pintura (*derecha*) se advierte que las sombras son, efectivamente, más oscuras que el rostro.

Dirigimos luego nuestra atención al área visual 2, región del córtex adyacente al área visual 1 y que recibe entradas de las tres sendas del área visual 1. Aplicamos la misma coloración mitocóndrica al área visual 2 y hallamos que también presentaba tres subdivisiones. Aquí, sin embargo, las subdivisiones se caracterizaban por tres especies de franjas alternantes, a las que dimos los nombres de franjas pálidas, franjas finas y franjas espesas, según los modos de colorearse.

Medimos la respuesta de las células

ELEVACION (MILIMETROS)





4. LOS MAPAS TOPOGRAFICOS suelen colorearse para que resulte más fácil comparar un punto del mapa con una escala de valores. En la mayoría se usan escalas cromáticas basadas en el espectro visible, representando el rojo las cotas más altas y el violeta las más bajas (*izquierda*). Pero ese tipo de escala adolece del inconveniente de que la forma del objeto no resulte obvia. Se remedia el problema (*derecha*) basando la escala cromática en la intensidad luminosa, donde el grado de intensidad corresponde al de elevación. Con un mapa topográfico basado en la luminosidad se distinguen los valores y se aprecia de un vistazo la forma general del objeto. (En la percepción de contrastes de luminosidad interviene una componente personal.)

de las distintas franjas a varios estímulos visuales y obtuvimos los resultados siguientes: las gotas cromoselectivas del área visual 1 inervaban las franjas finas del área visual 2, que continuaban el procesamiento de la información cromática. Las entregotas selectivas a la orientación enviaban señales a las franjas pálidas, cuyo modo de procesar la información sugería que estaban implicadas en el análisis de la forma. El magnosistema inervaba las franjas espesas, que analizaban la información sobre el relieve estereoscópico.

Zeki y su colega Stuart Shipp, así como John Maunsell y David C. Van Essen, del Instituto de Tecnología de California, han reunido pruebas según las cuales las tres vías se mantienen separadas en estadios superiores incluso del córtex cerebral. Han encontrado que las franjas espesas se proyectan al área mediotemporal (MT), región a la que conciernen el movimiento y la estereopsis (la capacidad para distinguir el relieve a partir de las diferencias entre las imágenes formadas en los dos ojos); las franjas finas se proyectan al área visual 4 (V4), a la que concierne el color; no están seguros acerca de qué vía sigan las proyecciones procedentes de las franjas pálidas.

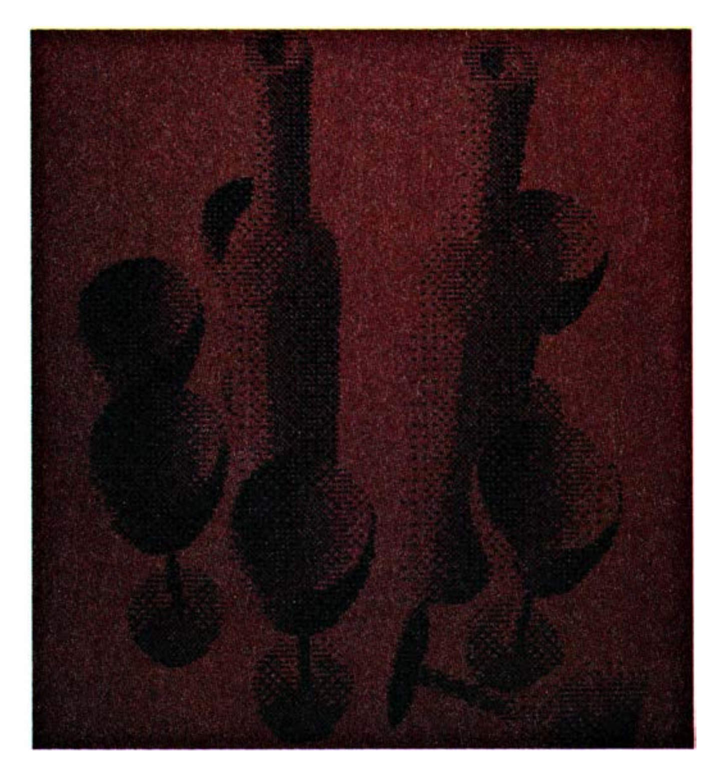
La neurología clínica aporta ulteriores pruebas de que el color, el movimiento y la percepción de la forma recorren vías cerebrales separadas. Ciertas lesiones cerebrales localizadas, causadas por golpes, pueden producir tipos de ceguera muy selectivos: pérdida de la capacidad de reconocer rostros o pérdida de visión de los colores sin pérdida de la percepción de las formas. La ceguera cortical a los colores constituye un raro síndrome resultante de la lesión de un área del cerebro que puede corresponder al área visual 4. Dado que el sistema de "gotas" no sólo transmite información sobre el color, sino tambien sobre la luminosidad, cabe esperar que los pacientes que tengan dañado su sistema del color muestren defectos en su capacidad para distinguir entre tonalidades de gris, así como en su percepción de los colores. De hecho, una paciente se quejaba de verlo todo descolorido y de que la nieve recién caída le parecía grisácea y sucia.

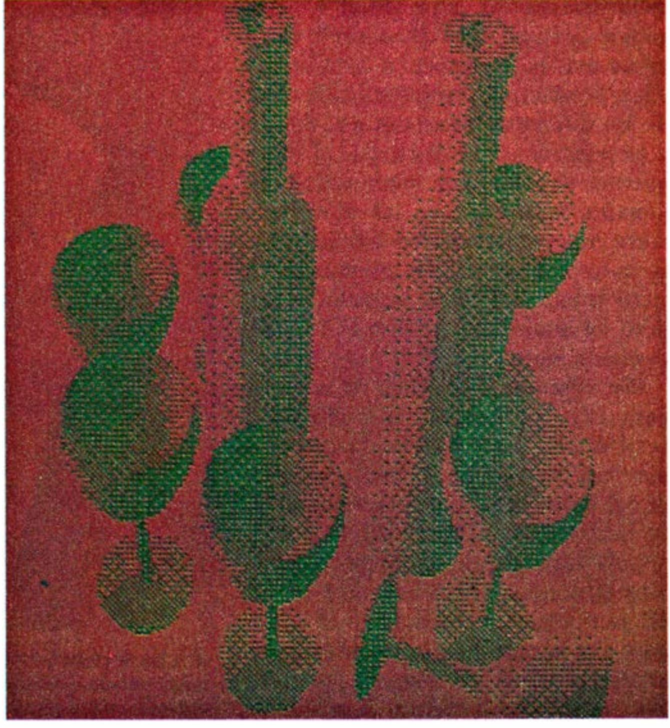
Basándonos en estos descubrimientos fisiológicos y anatómicos, podemos resumir como sigue las probables funciones de las tres subdivisiones del sistema visual:

El sistema parvo-entregotas-franjas pálidas conduce información altamente resolutiva sobre los límites constituidos por contraste de colores. Aunque las neuronas de los primeros estadios de este sistema son selectivas al color, las de los niveles superiores responden a los límites generados por contraste de colores, pero no llevan información sobre qué colores definen el límite. Dado que gran parte de la información sobre la forma de los objetos puede representarse por sus límites o bordes, sospechamos que este sistema también interviene en la percepción de la forma. La lentitud y la alta resolución propias de este sistema tal vez tengan su importancia para la capacidad de ver con gran detalle los objetos estacionarios.

El sistema gota-franja fina-V4 procesa la información sobre el color y las tonalidades del gris, pero no sobre el movimiento, la discriminación de las formas o el relieve. Este sistema es muy inferior en agudeza al entregotas y, por eso, ve los objetos en color pero no en gran detalle.

El sistema magno-4B-franja espesa-MT lleva información sobre el movimiento y sobre el relieve estereoscópico. Las neuronas de este conjunto muestran un tiempo de respuesta muy rápido, pero sus respuestas decaen en seguida aunque se mantenga el estímulo, por lo que el sistema es particularmente sensible a estímulos en movimiento. Así, detecta bien las imágenes que se mueven, pero sirve poco para escrutar las que están quietas. Además, parece ser ciego al color: es

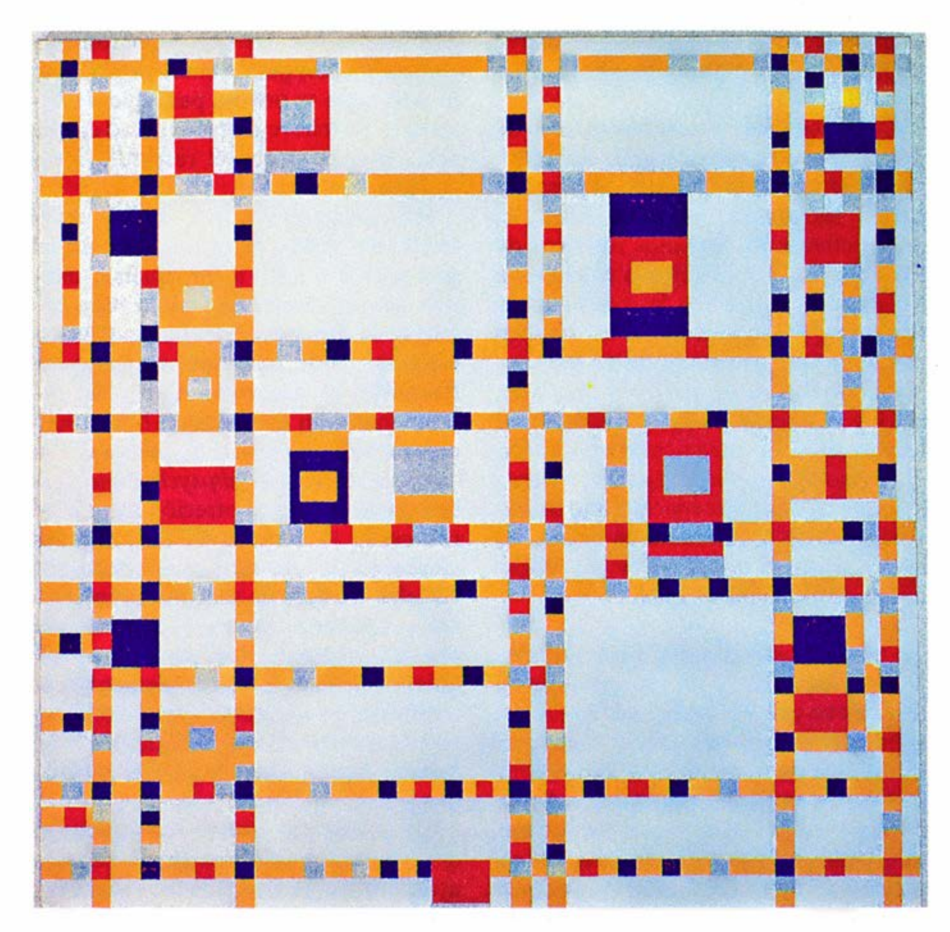




5. EL SOMBREADO puede crear una intensa sensación de profundidad, como prueba esta imagen generada por ordenador (*izquierda*). Cuando el sombreado se hace contrastando colores en vez de luminancias (*derecha*) se reduce la sensación de tridimensionalidad y resulta casi imposible distinguir la imagen. Este efecto sugiere que la percepción visual de profundidad se procesa en el magnosistema, ciego al color y más sensible a los contrastes de la intensidad luminosa.

incapaz de distinguir los límites formados sólo por contrastes cromáticos.

Las células del parvosistema pueden distinguir entre el rojo y el verde a cualquier luminosidad relativa de ambos. Por el contrario, las células del magnosistema ciego al color actúan como si fueran fotografías en blanco y negro: señalan información sobre la luminosidad de las superficies, pero no sobre sus colores. Para cualquier pareja de colores, por ejemplo el rojo y el verde, existe una determinada proporción de luminosidad a la que, en una fotografía en blanco y negro, aparecerán con la misma tonalidad de gris, esfumándose todo límite entre ellos. De manera semejante, a cierto nivel de luminosidad relativa entre el rojo y el verde, estos colores le parecerán idénticos al magnosistema. Se dice entonces que el rojo y el verde son equiluminantes. El borde entre dos colores equiluminantes tiene contraste cromático, pero no contraste de luminancias. La proporción exacta de luminosidad a la que el borde o límite entre dos colores le resulta invisible al magnosistema varía según las personas, lo mismo que varía la sensibilidad de distintas películas de blanco y negro a ciertos colores.



6. EL "OP ART" parece a menudo nervioso, como si los colores temblaran, fenómeno relacionado con la intensidad luminosa. Así se comprueba en esta pintura de Piet Mondrian intitulada *Broadway Boogie Woogie*, donde las franjas amarillas tienen poco contraste lumínico con el blancuzco trasfondo; es decir, franjas y fondo son casi equiluminantes. La impresión de movimiento es inducida por la reducida capacidad del cerebro para asignarles una posición estable a las franjas amarillas, con lo que éstas parecen bailar.

La división del sistema visual en tres partes, cada una de características enteramente distintas, nos indujo a Hubel y a mí a conjeturar que esas diferencias quizá se reflejasen en la percepción humana. Decidimos investigar ese extremo examinando las cuatro propiedades que diferencian en sus primeras fases el sistema magno del parvo: sensibilidad al color y al contraste, agudeza y velocidad. Queríamos saber, por ejemplo, si la percepción del movimiento y la del relieve son sensibles al color y al contraste y si tienen o no baja resolución espacial y alta resolución temporal. Un repaso de la bibliografía psicológica redactada a lo largo de más de un siglo nos proporcionó respuestas que cuadraban de manera admirable con la separación de funciones sugerida por los datos anatómicos y fisiológicos.

Una de nuestras preguntas había sido ya respondida por Patrick Cavanagh, Christopher Tyler y Olga E. Favreau, de la Universidad de Montreal, quienes demostraron que la percepción del movimiento era ciega al color. Comprobaron que, si en una pantalla de televisor producían unas franjas rojas y verdes en movimiento y las ajustaban de tal modo que fuesen equiluminantes, se reducía mucho la percepción de la velocidad del movimiento o las franjas de la pantalla parecían dejar de moverse. Ulteriores pruebas revelaron que la percepción del movimiento es también muy poco aguda, muy sensible a los contrastes y de respuesta muy rápida. Todas esas observaciones resultan coherentes con la hipótesis de que la percepción del movimiento es, principalmente, una función del magnosistema y no del parvosistema.

Cary Lu y Derek H. Fender, del Instituto de Tecnología de California, llevaron a cabo una serie de experimentos afines en los que comprobaron la sensibilidad de la estereopsis al color. Al estar los ojos separados cierta distancia, las escenas tridimensionales producen imágenes ligeramente diferentes en las dos retinas; el sistema visual interpreta esas diferencias como distancia. Lu y Fender comprobaron que en las imágenes estereoscópicas no se distingue la profundidad o el relieve cuando los estímulos estereoscópicos son equiluminantes. Ello sugiere que la estereoscopía, lo mismo que la percepción del movimiento, es ciega al color. Otros aspectos de la estereopsis parecen corresponder también a las características distintivas del magnosistema.

El descubrimiento nos llevó a concluir que esas dos funciones las desempeña casi exclusivamente el magnosistema. Nos preguntamos si otros aspectos de la visión mostrarían similares constelaciones de propiedades características. La estereoscopía es el caso de visión de la profundidad que más a menudo han estudiado los fisiólogos, probablemente porque resulta fácil cuantificarla. Pero no es el único ejemplo posible, ni la estereopsis es imprescindible para percibir el relieve, como cualquiera puede comprobar fácilmente cerrando un ojo. Si, al mirar una fotografía o una pintura, se experimenta alguna impresión de profundidad, por fuerza se está ignorando o pasando por alto la información estereoscópica de que la foto o el cuadro es, en realidad, una superficie plana. De ahí que, según lo hizo observar Leonardo da Vinci, podemos aumentar

la impresión de profundidad o relieve de una pintura mirándola con un solo ojo.

Quisimos saber si en otras señales de percepción no estereoscópica de la profundidad se daría también ceguera al color. Incluimos, entre aquéllas, la perspectiva y los tamaños relativos de los objetos, el movimiento relativo de los mismos (al mover la cabeza hacia los lados, las imágenes de los objetos más próximos cruzan la retina más deprisa que las de los objetos más lejanos) y los sombreados y gradaciones texturales. Encontramos que en todos esos casos se producía ceguera al color, lo cual nos llevó a sospechar que la mayor parte de la información acerca de la profundidad y del relieve se transmite por el magnosistema.

Los sombreados constituyen una importante señal para la percepción del relieve y de la forma; por eso le resulta más difícil al esquiador distinguir los baches de una ladera nevada cuando el cielo está muy encapotado. En la mayoría de las situaciones de luz natural, las sombras difieren más por su grado de intensidad luminosa que por su color. De ahí que, sin que tenga que ser ciega al color, la parte del sistema visual que reconoce las formas a partir de las sombras que producen no necesite transmitir información cromática. Así lo demostraron Cavanagh y su colega Yvan LeClerc en una serie de experimentos con los que probaron que cualquier color puede hacer de sombra: lo único que se precisa para que dé impresión de relieve o profundidad es que sea más oscuro que el resto de la superficie.

Nos preguntamos por qué el magnosistema habría de responder tanto al movimiento como a los muchos indicios que se toman en cuenta para enjuiciar la distancia y las relaciones espaciales. ¿Por qué esta variedad de funciones en particular había de desempeñarla un solo sistema? A principios de siglo, la escuela de pensamiento conocida como *Gestaltpsychologie* (psicología de la forma) ofreció una posible respuesta: la mayoría de las imágenes contienen un rico surtido de elementos visuales —trazos de muchas orientaciones y superficies, colores y texturas que son homogéneos. La percepción requiere que esos diversos elementos se organicen de tal modo que los relacionados entre sí (los pertenecientes a un mismo objeto) queden juntos, agrupados.

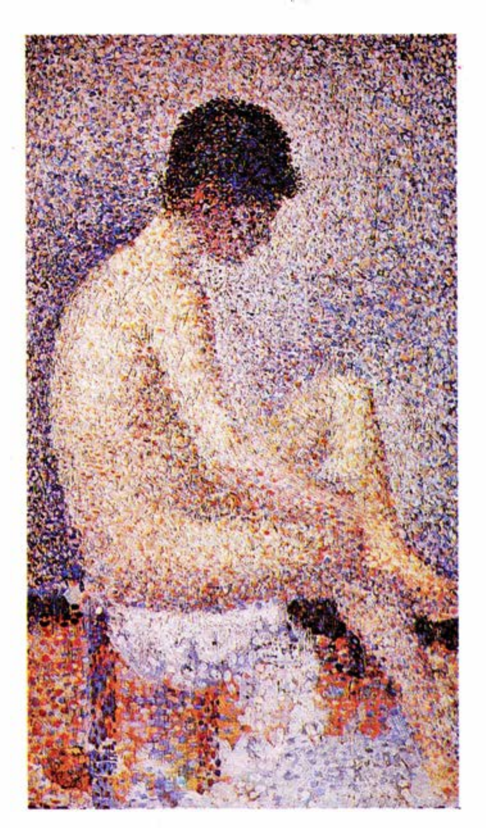
Los psicólogos gestaltistas sugirieron que ello era posible porque el cerebro utiliza ciertas propiedades visuales para agrupar las partes de una imagen y también para separar las imágenes unas de otras y del trasfondo. Entre esas propiedades se cuentan la dirección y la velocidad del movimiento (es probable que los elementos que se mueven juntos pertenezcan al mismo objeto); la colinealidad (perceptualmente una casa no se divide en dos cuando frente a ella cruza un cable telefónico); la profundidad (aunque dos bordes sean contiguos, puede que no parezcan pertenecientes al mismo objeto si no están a la misma distancia del observador), y la intensidad lumínica y la textura (las diversas partes de un mismo objeto suelen tener las mismas propiedades superficiales). El que en condiciones de equiluminancia dejaran de producirse todas esas funciones nos sugirió que la capacidad de conjuntar las partes de una escena, distinguir la figura del fondo y percibir la correcta relación espacial entre los objetos, bien pudiera depender toda ella del magnosistema. Supusimos que el magnosistema debía combinar las propiedades visuales de un objeto y capacitarlo así para que su imagen se perciba como un todo, dejando libre al parvosistema para ver los detalles.

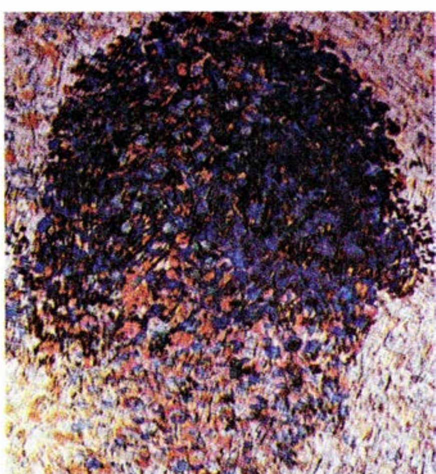
¿Qué implicaciones pueden tener estas ideas en el arte y el diseño? Aunque las explicaciones neurobiológicas de muchos de los fenómenos que he descrito se han obtenido recientemente, muchos artistas y diseñadores parecen ser conscientes de los principios que les sirven de base. Entender cómo procesa el cerebro la información visual puede que facilite aún más a los artistas y diseñadores los máximos logros de determinados efectos.

Por ejemplo, es probable que algunos de los efectos peculiares del "op art" se deriven de combinaciones cromáticas que actúan como poderosos activadores del parvosistema y estimulan débilmente el magnosistema. Un objeto equiluminante con su trasfondo parece vibrante e inestable. La razón de ello es que el parvosistema señala la forma del objeto, pero el magnosistema no distingue los bordes y, por tanto, no puede señalar si el objeto se mueve ni en qué posición está. De ahí que semeje agitarse, hallarse a la deriva o vibrar sobre el lienzo.

Los carteles publicitarios contienen a menudo palabras clave trazadas en un color de igual intensidad luminosa que el fondo. Aunque bajo tales condiciones cuesta más leer el texto, la elección de ese color débese a la extraña apariencia saltarina creada por la equiluminación, que atrae la atención del observador. Sea accidental, empírico o consciente, el resultado es que el lector ha de dedicar más tiempo a leer esas palabras si quiere descifrarlas.

Los mismos principios se aplican a la





7. SE FUSIONAN LOS COLORES cuando los trazos o dibujos son demasiado finos para que los perciba el sistema captador del color, cuya capacidad resolutiva es escasa. Las pinturas puntillistas, como ésta de Georges Seurat (*izquierda*), producen tal efecto cuando están hechas de motitas lo bastante grandes para que las perciba el sistema captador de la forma pero demasiado pequeñas para el sistema del color. Al mirar la pintura más de cerca (*derecha*), las motitas pueden ser captadas por ambos sistemas. Un efecto parecido se advierte en la trama de cuatro colores que forma las ilustraciones impresas.

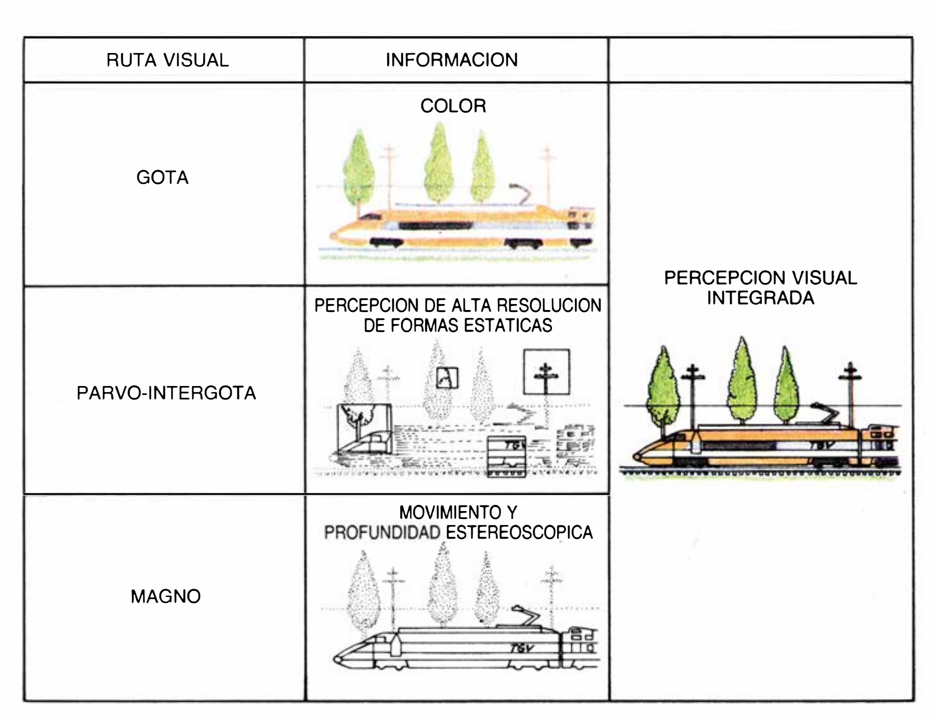
moda. En la impresión general que produzca la forma de un vestido pueden influir las líneas de su corte, su elegancia; mas, para que sean efectistas, en esas líneas ha de haber contrastes de luminosidad: cuanto mayor fuere tal contraste, mayor será el efecto. Y a la inversa, los modelos no chocan con la línea de un vestido si están formados por colores de igual luminosidad. Las franjas horizontales, por ejemplo, no suelen hacer que quien las lleva parezca más bajo y más ancho si todas ellas son aproximadamente de la misma intensidad lumínica o si son muy estrechas. La combinación de una blusa de color verde chillón con unos pantalones azul eléctrico produce una llamativa, vibrante zona horizontal intermedia que no contribuye mucho a la impresión general de forma o a que se fije allí la mirada. Pero si esos mismos pantalones se combinan con una blusa de color similar pero diferente tono, azul celeste o azul marino, por ejemplo, entonces la mirada se dirige hacia la zona de encuentro de ambas prendas y el efecto general es menos vertical.

El sistema de gotas, selectivo al color, tiene una capacidad de agudeza muchas veces inferior a la del sistema entregotas. Ello explica un fenómeno que se conoce por lo menos desde hace un siglo: dos colores pueden producir efectos enteramente opuestos el uno sobre el otro según sea su disposición espacial. Cuando se yuxtaponen dos colores diferentes, crean una sensación de mutua oposición: cada uno diverge más del otro (tienden a complementarse). Ahora bien, cuando los dos colores se interdigitan en bandas muy finas, se produce el efecto contrario: vienen a parecerse más el uno al otro, se funden, o "deslíen", entre sí. Nuestra opinión es que tal fusión ocurre cuando la muestra es demasiado apretada para que el sistema selectivo del color la resuelva.

Un efecto parecido se advierte en las ilustraciones impresas, al fusionarse las microscópicas motas que forman la imagen porque los humanos no somos capaces de distinguir esas manchitas con nuestros sistemas captadores de la forma ni del color. El fenómeno sólo resulta advertible cuando los trazos de la imagen, como las pinceladas de un cuadro impresionista o las motitas de una pintura puntillista, son demasiado pequeños para que los resuelva nuestro sistema perceptor del colorido pero lo bastante grandes para que logre resolverlos nuestro sistema de la forma. En-



8. LA POSICION IMPRECISA DEL COLOR en muchas acuarelas, como en esta reproducción de *Madre e hijo*, de Pablo Picasso, no impide la asignación de los colores a los objetos de la imagen. Los colores parecen adaptarse a las formas dibujadas más exactamente de lo que en realidad lo están, y ello porque el sistema del color es tres o cuatro veces menos agudo que el de la forma. Esta técnica resulta efectiva sobre todo con acuarelas y pasteles, porque sus colores son pálidos y no contrastan mucho con el tono de fondo.



9. LA VISION constituye un sistema perceptual tripartito. Los colores se tratan por la vía de las "gotas", la percepción de las formas estáticas corre a cargo de la senda "parvo-entregotas" y el movimiento y la profundidad los procesa e interpreta la vía del magnosistema. El resultado final se integra de tal modo que el observador ve un mundo unificado en el espacio tridimensional. (Los dibujos son de Patricia J. Wynne).

tonces, el observador distingue las pinceladas o manchas, pero el color se funde. Hay, pues, una gama relativamente estrecha de tamaños de diseño sobre los cuales se pueden distinguir los trazos, pero no se acierta aún a separar diversos bloques de color. Esa gama la define la diferencia entre el poder resolutivo del sistema perceptor del color y el del sistema perceptor de la forma. Parecida fusión de los colores sin que se fusione el dibujo es frecuente en tejidos de diseño fino, como las mezclillas o los rayados.

La industria televisiva saca partido de la baja resolución del sistema del color transmitiendo la parte coloreada de una imagen con menor resolución que la parte de blanco y negro; ello reduce la cantidad total de información que ha de transmitirse. La menor agudeza del sistema del color explica también por qué muchos artistas, al trabajar con acuarelas o pasteles, aplican los colores de manera bastante imprecisa sobre una superficie abocetada y, no obstante, producen el mismo efecto visual que si los aplicasen con precisión dentro de aquellos contornos.

El conocimiento de la separación de funciones en el sistema visual puede serle útil a los artistas, anunciadores y diseñadores; puede también tener interés en el proyecto de sistemas de vigilancia, a la hora de aumentar la visibilidad de imágenes difusas, poco resaltantes o camufladas, y para diseñar videosistemas destinados a la robótica o a la navegación automática. La sensibilidad del magnosistema al contraste de colores, al movimiento y a la estereopsis sugiere que los objetos de visión difícil pueden hacerse más visibles con la introducción del movimiento (moviendo simultáneamente dos imágenes de la misma escena tomadas desde diferentes posiciones). Tal enfoque capacitaría a los radiólogos para interpretar imágenes borrosas, como las de los rayos X, con mayor exactitud.

Hasta hace poco, sólo podían correlacionarse algunos aspectos de la psicología de la percepción y de la estética con lo que se sabía sobre el procesamiento de la información por parte de nuestro cerebro. La situación está cambiando y las investigaciones sobre la visión se hallan en un momento apasionante de su historia. El arte, la psicología y la neurobiología empiezan a intercambiarse un creciente caudal de informaciones y, procediendo así, contribuyen al más enriquecedor interdisciplinarismo.

El transformador

Hace justamente un siglo, este sigiloso dispositivo hizo viable la distribución de energía eléctrica. Aunque muchos elementos de la vida moderna dependen de él, sigue constituyendo uno de los héroes anónimos de la tecnología

John W. Coltman

La revolución tecnológica que ha conformado la civilización de los últimos cien años nació de avances fundamentales en las comunicaciones, los transportes y la energía eléctrica. Los logros supremos de los inventores en las comunicaciones y los transportes —teléfono, televisión, automóvil y avión— son hoy elementos familiares de la vida cotidiana. En cambio, el invento que aseguró la omnipresencia de la energía eléctrica ha pasado en gran parte inadvertido para aquellos cuyas vidas afecta directamente. Se trata de un dispositivo que no se mueve, silencioso y oculto en sótanos o disimulado por mamparas.

Nos referimos al transformador, un ingenioso instrumento desarrollado a finales del siglo XIX. El transformador es un componente esencial de las redes modernas de suministro eléctrico. Explicado con sencillez, puede convertir electricidad de baja corriente y alta tensión en electricidad de alta corriente y baja tensión (y viceversa) sin perder apenas energía. Esta conversión es importante porque la energía eléctrica se transmite con mayor rendimiento a altas tensiones, pero se genera y se utiliza mejor a bajas tensiones. Si no fuera por los transformadores, tendría que acortarse la distancia que separa a los generadores de los consumidores; muchos hogares e industrias necesitarían su propia central y la electricidad sería una forma de energía bastante menos cómoda.

Además de su función en la red de suministro eléctrico, el transformador es un componente integral de muchos objetos que operan con electricidad. Lámparas de mesa, cargadores de pilas, trenes de juguete y televisores cuentan con transformadores para reducir o aumentar la tensión. En sus múltiples aplicaciones, la magnitud del transformador puede variar desde pequeños conjuntos del tamaño de un guisante a monstruos que pesan 500 toneladas o más. Este artículo se centrará en los transformadores de redes de energía, pero los principios que gobiernan el funcionamiento de los transformadores eléctricos son los mismos, sin distinción de tamaño o aplicación.

El físico inglés Michael Faraday descubrió el funcionamiento básico del transformador en 1831, durante sus investigaciones pioneras sobre la electricidad. Unos 50 años más tarde, la aparición de un transformador práctico, que contenía ya todos los elementos esenciales del instrumento moderno, revolucionó la naciente industria del alumbrado eléctrico. Al llegar el nuevo siglo, el suministro eléctrico por corriente alterna se había adoptado universalmente y el transformador había adquirido un papel clave en la transmisión y distribución de la energía eléctrica.

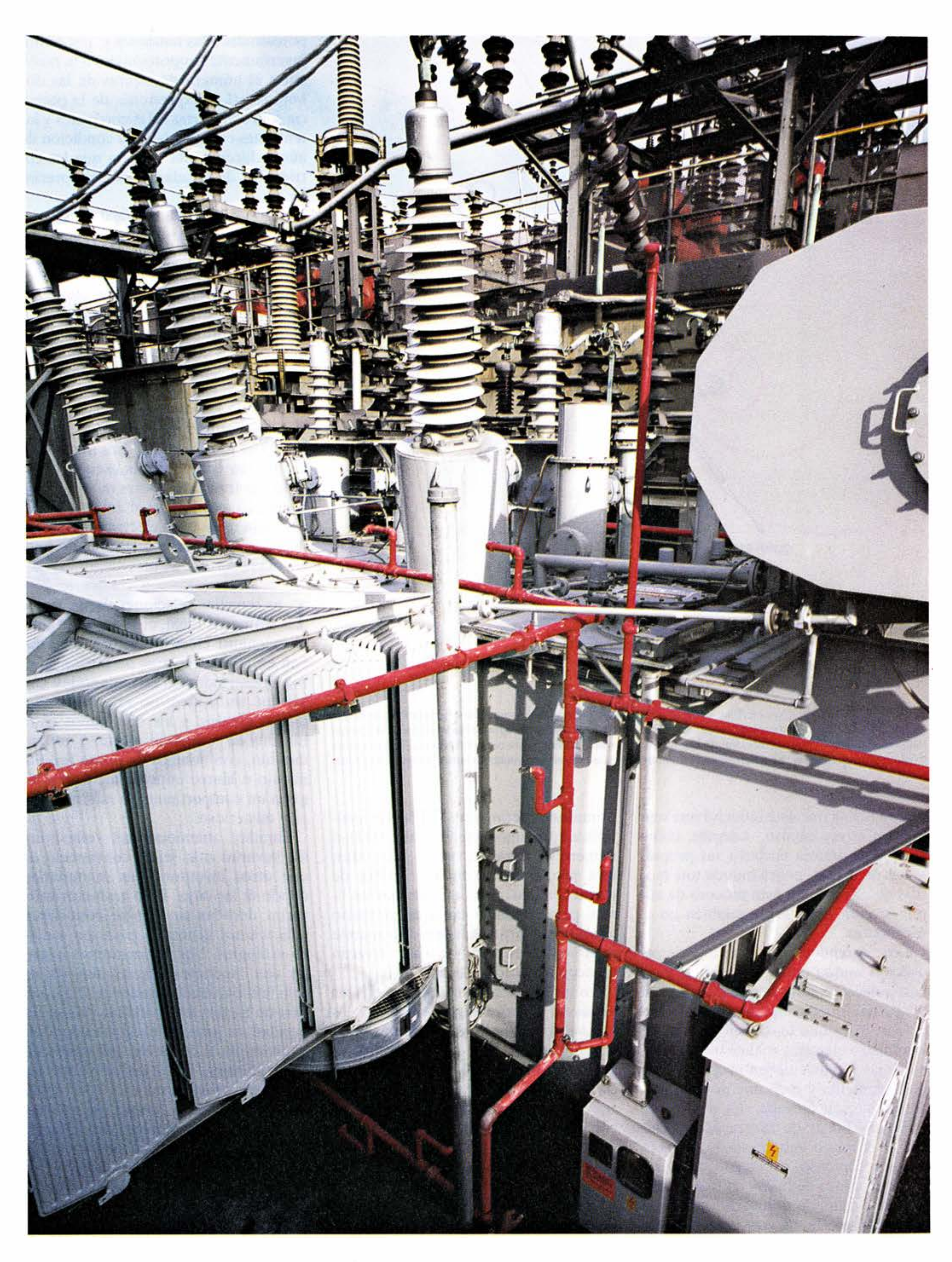
No obstante, la historia del transformador no termina en 1900. Los actuales pueden admitir una potencia 500 veces mayor y una tensión 15 veces superior a las de sus antecesores de principios de siglo; el peso por unidad de potencia ha disminuido en un factor de 10 y el rendimiento supera normalmente el 99 por ciento. Estos avances reflejan la conjunción entre la investigación teórica y la ingeniería, que primero aclararon, y a continuación explotaron, los fenómenos que determinan el funcionamiento del transformador.

Las investigaciones de Faraday se inspiraron en el trabajo del físico danés Hans Christian Oersted. Había éste mostrado, en 1820, que una corriente eléctrica circulante por un material conductor crea un campo magnético a su alrededor. El descubrimiento de Oersted se recibió como algo extraordinario en su tiempo, pues creíase que la electricidad y el magnetismo constituían fuerzas distintas, sin ninguna relación entre sí. Si una corriente eléctrica podía generar un campo magnético, parecía probable que éste a su vez diera lugar a una corriente eléctrica.

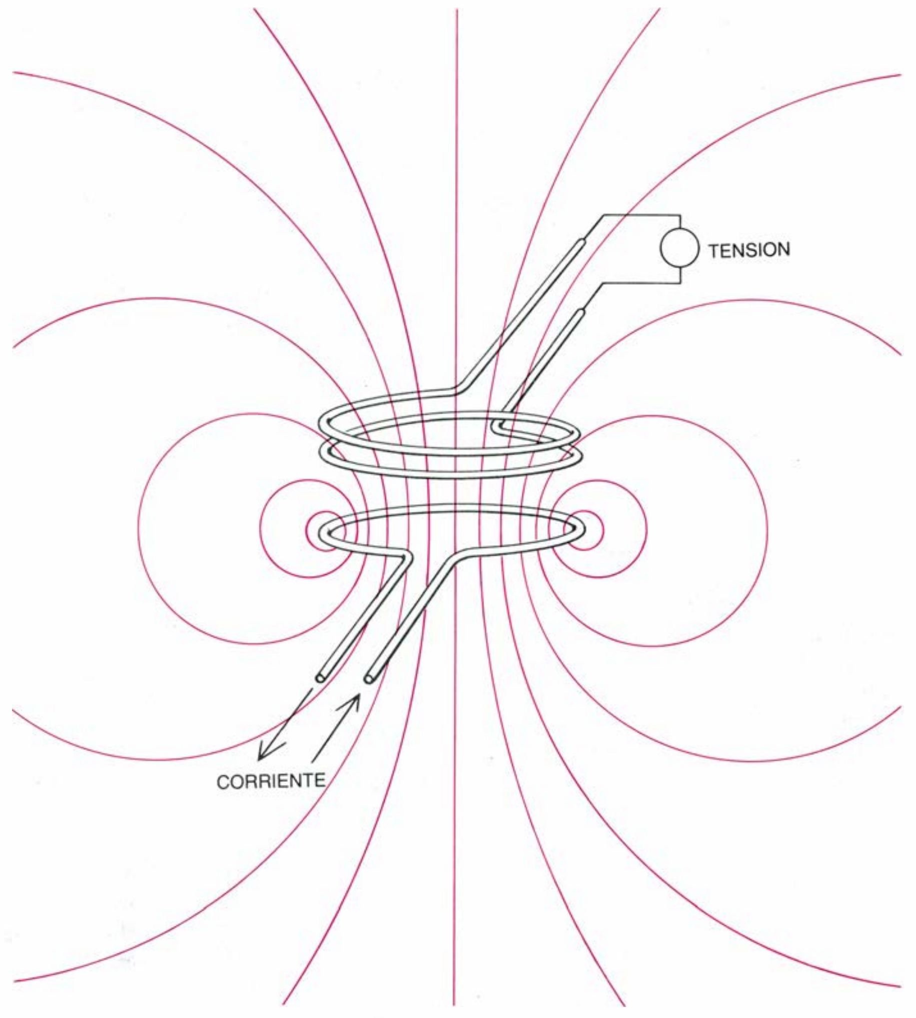
En 1831, Faraday demostró que, para inducir una corriente en un conductor, el campo magnético debía estar cambiando. Faraday hacía fluctuar la magnitud del campo cerrando y abriendo el circuito eléctrico que generaba el campo; el mismo efecto podía lograrse con una corriente cuya dirección fuera alterna en función del tiempo. Esta fascinante interacción entre electricidad y magnetismo llegaría a conocerse por inducción electromagnética.

Comprenderemos mejor la inducción en términos de líneas de fuerza, convención que introdujo el propio Faraday para describir la dirección y magnitud de un campo magnético. Las líneas de fuerza del campo magnético generado por una corriente en una espira se muestran en la figura 2. Si se introduce en un campo magnético alterno una segunda espira independiente, se induce en la espira una diferencia de potencial, o tensión, que es proporcional al cambio por unidad de tiempo del número de líneas de fuerza encerradas por la espira. Si ésta tiene dos vueltas, la inducción se produce en cada una de ellas y se obtiene una tensión doble; si la espira tiene tres vueltas, se alcanza una tensión triple, y así sucesivamente. (Podemos representar la tensión dibujando la presión que empuja las cargas; la corriente es el ritmo del flujo de cargas. El producto de estas dos magnitudes —tensión en volt multiplicada por corriente en ampère— es igual a la potencia eléctrica, en watt.)

En un transformador, la espira alimentada por la corriente que genera el campo magnético se llama primario; secundario, la que intercepta el campo. La inducción entre el primario y el secundario es mutua; es decir, una corriente que circule por el secundario inducirá una tensión en el primario de la



1. TRANSFORMADOR DE UNA CENTRAL ELECTRICA de la ciudad de Nueva York. Convierte electricidad de alta corriente y baja tensión en electricidad de baja corriente y alta tensión, necesaria para su transmisión. Unos radiadores (*izquierda*) refrigeran el transformador y unos bornes cilíndricos lo unen con las líneas de suministro. Otros transformadores más lejanos reducen la tensión a niveles apropiados para la distribución y el consumo (*figura 6*).



2. LINEAS DE FUERZA: describen el campo magnético que emana de una espira (primario) por la que circula una corriente. Una bobina (secundario) colocada en el campo intercepta las líneas (*color*); si el campo magnético fluctúa, como ocurre cuando la bobina primaria se alimenta con corriente alterna, inducirá una tensión en la secundaria. Esta inducción electromagnética es la base del funcionamiento del transformador.

misma forma que éste inducirá una tensión en el secundario. Además, como la espira primaria encierra sus propias líneas de fuerza, podrá inducir una tensión en ella misma; este proceso de autoinducción tiene lugar también en el secundario.

Los fenómenos concurrentes de inducción mutua entre las bobinas y de autoinducción en cada una de ellas son la raíz del funcionamiento del transformador. Para que un transformador de suministro eléctrico realice bien su trabajo, las bobinas deben acoplarse casi perfectamente y cada una poseerá una autoinducción elevada. Es decir, casi todas las líneas de fuerza encerradas por el primario deben estarlo también por el secundario, y, además, ha de ser alto el número de líneas de fuerza producidas por un determinado cambio en la magnitud de la corriente. Ambas condiciones pueden cumplirse devanando las bobinas del primario y del secundario alrededor de un núcleo de hierro, como lo hizo Faraday en sus primeros experimentos. El hierro multiplica aproximadamente por 10.000 el número de líneas de fuerza generadas; esta propiedad recibe el nombre de permeabilidad. Confina también las líneas para que las bobinas del primario y del secundario se hallen físicamente separadas y, a pesar de ello, ofrezcan un acoplamiento magnético cabal.

En un transformador ideal, todas las líneas de fuerza pasan a través de las espiras de ambas bobinas. Ahora bien, el campo magnético que está cambiando produce la misma tensión en cada espira de una bobina; por tanto, la tensión total inducida en una bobina será proporcional al número total de espiras. Si no se pierde en el transformador, la potencia disponible en el secundario debe ser igual a la potencia que alimenta al primario; en otras palabras, el producto de la tensión por la corriente en el secundario equivale al producto de la tensión por la corriente en el primario. De esta forma, ambas corrientes han de ser inversamente proporcionales a las tensiones y, por tanto, inversamente proporcionales a la razón entre el número de espiras de las dos bobinas. (Las expresiones de la potencia sólo son ciertas si las corrientes y las tensiones están en fase; la condición de autoinducción alta asegura que las corrientes desfasadas sean despreciables.)

Este transformador ideal facilita al ingeniero eléctrico una herramienta semejante a la palanca del mecánico; pero en vez de convertir fuerza y movimiento, el transformador maneja tensión y corriente. La característica que define el funcionamiento del instrumento no es aquí la longitud del brazo de palanca, sino la razón del número de espiras. Por supuesto, el transformador ideal no se ha inventado todavía, pero se han obtenido en la práctica aproximaciones muy logradas. Los núcleos de hierro son componentes esenciales de todos los transformadores modernos de suministo eléctrico, y el cobre, debido a su baja resistencia eléctrica, fue, y todavía es, el material seleccionado para las bobinas.

Las sencillas relaciones de un transformador ideal, el abecedario para el ingeniero eléctrico actual, no estaban en absoluto claras para los primeros investigadores. Los montajes con los que trabajaban no eran ni mucho menos ideales, y los fenómenos combinados de inducción mutua y autoinducción, con bobinas de pobre acoplamiento e hierro imperfecto, daban lugar a un comportamiento más complejo y misterioso.

Faraday abandonó sus reflexiones sin llevarlas más lejos, convencido de que otros inventores las reanudarían donde él las dejó. Pero transcurrieron varias décadas sin que se conocieran aplicaciones generales para esa suerte de artilugios. Los experimentos iniciales con "inductores", dotados de un solo hilo enrollado alrededor de un núcleo de hierro, maravillaban por su capacidad de generar chispas cuando se interrumpía la corriente que alimentaba a la bobina. Entre los eminentes sabios que investigaron este fenómeno, merece ser citado Joseph Henry, primer secretario y director del Instituto Smithsoniano, en cuyo honor se dio nombre a la unidad de inducción.

Durante ese período de experimentación, se hizo patente que las corrientes que circulaban en núcleos sólidos metálicos desperdiciaban energía. Para reducir tales corrientes parásitas de Foucault, así se llaman, se construyeron núcleos que no eran conductores

en la dirección perpendicular a las líneas de fuerza magnéticas del transformador. Eso se conseguía fabricando el núcleo con un rollo de cable de hierro, único.

El trabajo de este período se llevó a cabo utilizando siempre pilas como fuentes de corriente, abriendo y cerrando el circuito primario para producir el cambio necesario de corriente. En la década de 1860, la introducción de la dinamo –un generador eléctrico basado también en las predicciones de Faraday– permitió disponer de corriente alterna de una forma generalizada. La primera persona que conectó un transformador a una fuente de corriente alterna fue Sir William Grove, que necesitaba suministro de alta tensión para su trabajo de laboratorio. Sin embargo, en ausencia de una aplicación comercial visible, se subestimó la importancia del dispositivo, y permaneció arrinconado hasta que Thomas Edison comenzó a promover la idea de un sistema de alumbrado eléctrico en la década de 1880.

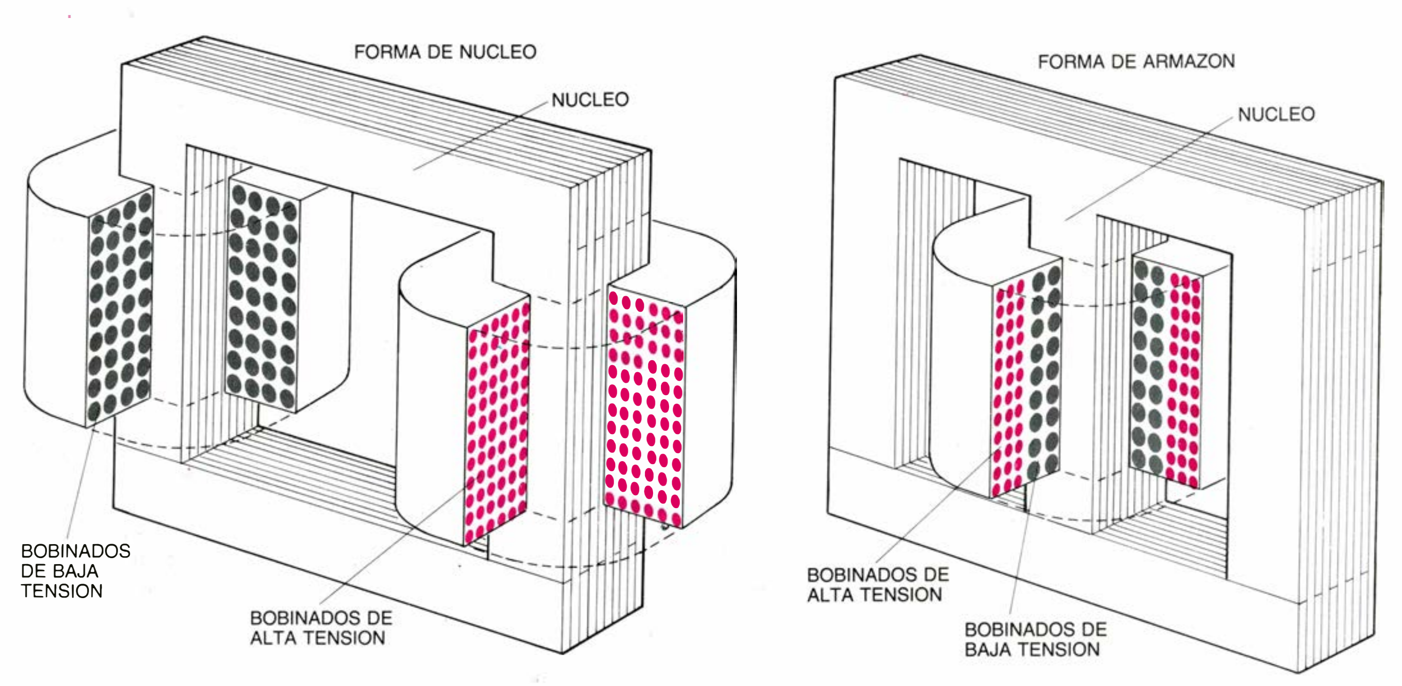
Cuando Edison lanzó su proyecto, se contaba ya con bombillas equipadas con filamento de platino; se utilizaba también el alumbrado por arco, en el cual la corriente forma un "arco" entre dos electrodos, en vez de pasar a través de un filamento. Ambas clases de lámparas funcionaban bien, pero sus características eléctricas imponían algunas limitaciones en la forma de conexión. En especial, tenían que conectarse en serie en un circuito continuo, como las viejas luces de los árboles navideños. En consecuencia, todas las luces del sistema debían encenderse o apagarse simultáneamente.

Aunque esta disposición se adaptaba al alumbrado urbano, por citar un ejemplo, la imposibilidad de encender y apagar distintas lámparas a voluntad, y las altísimas tensiones que estaban presentes en el sistema cuando se unían en serie un número elevado de lámparas, constituían razones de peso para rehusar el alumbrado eléctrico en serie en hogares e instalaciones pequeñas. Por otro lado, los sistemas en paralelo, en los que cada lámpara funciona en su propio "subcircuito", necesitaban grandes cables de cobre, nada manejables, para alimentar las bombillas de alta corriente y baja resistencia de esa época. El mayor logro de Edison fue la introducción de una bombilla con filamento de carbono que, debido a su alta resistencia, posibilitó la conexión en paralelo. En la ciudad de Nueva York, con bombillas de este tipo y un generador de energía eléctrica de corriente continua, abrió Edison la primera instalación comercial de alumbrado, en 1882.

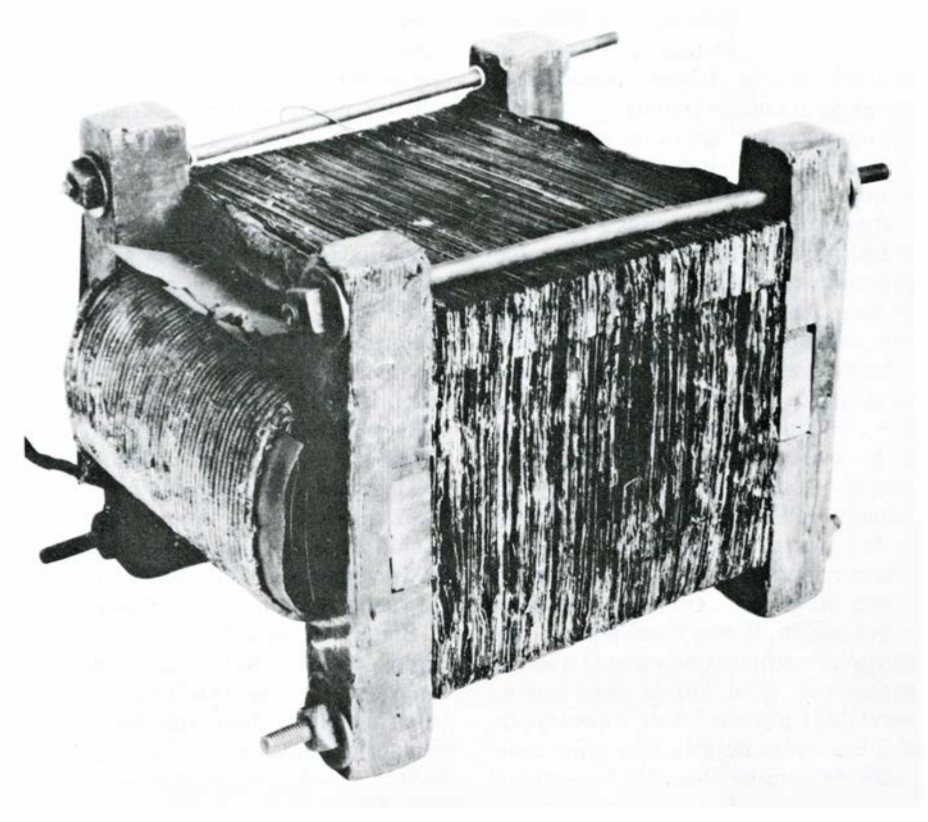
Por entonces también, en Inglaterra, se incorporaron transformadores en un sistema de alumbrado. Lucien H. Gaulard y John D. Gibbs –un inventor francés y un promotor inglés– utilizaron un tipo de transformador para añadir lámparas incandescentes a un sistema de alumbrado por arco de corriente alterna. Debido a que las lámparas de arco se conectaban en serie, con una corriente fija circulando por la red, los primarios de sus transformadores estaban necesariamente en serie con las lámparas de arco. En 1882, Gaulard y Gibbs patentaron el dispositivo, al que llamaron generador secundario. Dieron a conocer su sistema en Inglaterra en 1883, y, al año siguiente, en Italia. El generador secundario, que no era un equipo muy práctico, apenas si se empleó, pero sirvió para estimular la inventiva de otros autores.

Entre quienes mostraron interés por el trabajo de Gaulard y Gibbs había tres ingenieros húngaros de la empresa Ganz de Budapest. Vieron la demostración en Italia y se dieron cuenta de las desventajas de la conexión en serie. De vuelta a Budapest, Max Déri, Otto T. Bláthy y Karl Zipernowski construyeron varios transformadores para su conexión en paralelo a un generador. Estos ingenieros diseñaron dos tipos de transformadores con núcleos cerrados de hierro, que se adaptaban mucho mejor a la conexión en paralelo que los bobinados con extremos abiertos; en uno de ellos, los conductores se devanaban alrededor de un núcleo toroidal (en forma de rosquilla), mientras que en el otro los hilos del núcleo de hierro se devanaban alrededor de un rollo toroidal de conductores.

En mayo de 1885, Déri, Blathy y Zipernowski concurrieron a la exposición Nacional Húngara de Budapest con lo que suele considerarse el prototipo de



3. ESTOS DOS DISEÑOS DE TRANSFORMADORES ilustran diferentes tipos de estructura del núcleo y su cableado. Ambos núcleos están hechos de chapas apiladas que se han obtenido por troquelado de planchas de acero. En el diseño de la izquierda, llamado forma del núcleo, el primario envuelve un brazo del núcleo y el secundario el otro. El núcleo con forma de armazón a la derecha está preparado con chapas troqueladas en forma de E, con las bobinas del primario y del secundario anidadas en la barra central. En los transformadores trifásicos, las bobinas se anidan en las tres barras (*véase la figura 5*).



4. TRANSFORMADOR DE STANLEY, de la primera central eléctrica de corriente alterna, en Great Barrington, Massachusetts; es de 1885. El transformador tiene unos treinta centímetros de longitud; los bobinados de cobre envueltos en algodón sobresalen entre los topes de madera de la izquierda. El brazo central de las chapas de hierro con forma de E se introducía en direcciones alternas en una bobina devanada. Los extremos de los otros dos brazos son las zonas densas de la parte superior e inferior de las chapas.

los actuales sistemas de alumbrado. Su sistema incluía 75 transformadores en paralelo que alimentaban 1067 bombillas incandescentes de Edison desde un generador de corriente alterna que suministraba 1350 volt. Los transformadores presentaban núcleos de hierro toroidales con los conductores laboriosamente bobinados. Aunque eran caros de construir, alcanzaban un rendimiento suficiente en el cumplimiento de la función encomendada: operar con bombillas de baja tensión a partir de un sistema de distribución de alta tensión.

Un norteamericano, de nombre George Westinghouse, quedó también impresionado por la demostración de Gaulard y Gibbs en Italia. En la década de 1880 Westinghouse se había convertido en inventor y fabricante de buena reputación; trabajaba en la distribución de gas natural para alumbrado. Durante los años del éxito de Edison se interesó por la energía eléctrica, pero se había mostrado cauto sobre su posible aplicación. Su escepticismo estaba fundado: en un sistema en paralelo, el aumento de carga solicita un aumento de corriente, y una "carga" del tamaño de una ciudad necesitaría cantidades asombrosas de corriente. Ahora bien, la transmisión de energía de corriente elevada no se distingue por su buen rendimiento; sería necesario, pues, enviar la energía eléctrica a través de cables enormes de cobre o construir centrales generadoras cercanas a las cargas, sembrando la ciudad de múltiples estaciones menores.

Por otro lado, sí era posible la transmisión eficiente de energía eléctrica de alta tensión con cables bastante pequeños. Mucha gente buscaba formas de transmitirla a tensiones superiores a las exigidas en el punto de utilización. En 1884, Westinghouse contrató a un joven ingeniero, William Stanley, que tenía ya en la cabeza algunas ideas sobre la resolución del problema con transformadores. Cuando se enteró del trabajo de Gaulard y Gibbs, animó a Westinghouse a suscribir una opción sobre las patentes de los transformadores. Stanley estaba convencido de la superioridad de la conexión en paralelo; a principios del verano de 1885, había diseñado ya algunos transformadores de núcleo cerrado.

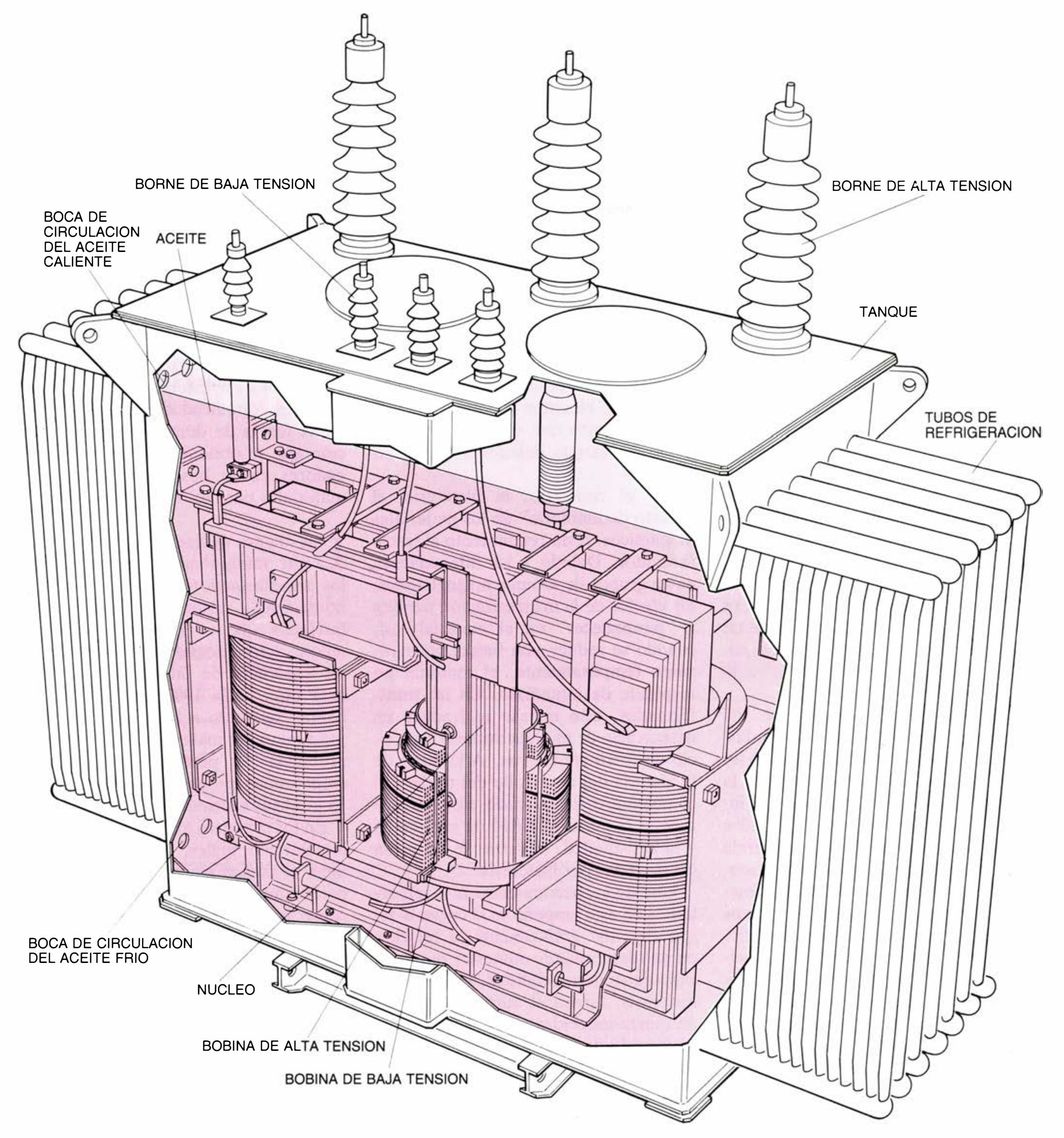
Poco después, problemas de salud aconsejaron establecer el laboratorio de Stanley lejos de la atmósfera contaminada de humos del Pittsburgh de aquella época. Con la aprobación de Westinghouse, se mudó a Great Barrington, en Massachusetts, y continuó su trabajo sobre los transformadores. Entre tanto, Westinghouse, que no estaba completamente convencido del acierto de la conexión en paralelo, investigó diversas combinaciones de los generadores secundarios de Gaulard y Gibbs con otro pionero de la ingeniería eléctrica, Oliver B. Shallenberger.

En diciembre de 1885, Stanley había hecho suficientes progresos para convencer a Westinghouse. Con la ayuda de Shallenberger y otro brillante ingeniero, Albert Schmid, Westinghouse emprendió la modificación del transformador de Stanley de manera que (a diferencia del modelo toroidal húngaro) pudiera fabricarse barata y fácilmente. El núcleo constaba de chapas delgadas de hierro cortadas, en un principio, en forma de letra H. Las bobinas de hilo de cobre aislado se devanaban alrededor de la barra central de la H; a continuación, los extremos de ésta se cerraban con tiras separadas de hierro. Stanley sugirió fabricar las chapas troqueladas de hierro en forma de E, para que las puntas centrales pudieran introducirse en una bobina devanada previamente. Las chapas troqueladas con forma de E se introducían en direcciones alternativas, colocándose piezas rectas de hierro en los extremos de los brazos para completar el circuito magnético. Esta forma de construcción pervive todavía.

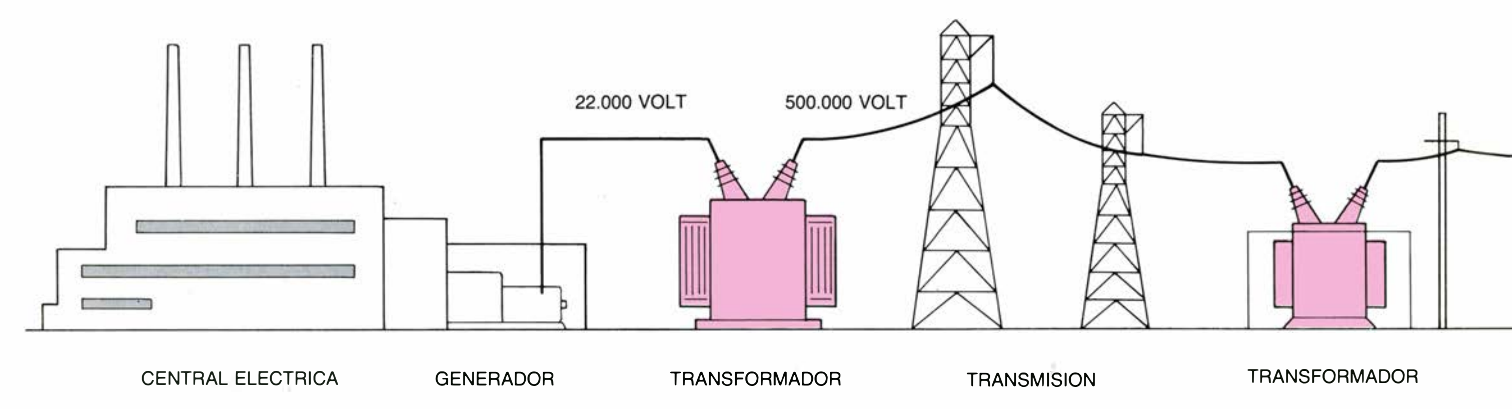
La Westinghouse Electric Company se constituyó en enero de 1886. Durante los meses siguientes, Westinghouse y sus socios patentaron el proceso de inserción de placas apiladas de hierro en bobinas devanadas con anterioridad, las medidas de refrigeración y aislamiento del transformador por inmersión en aceite y el empaquetamiento del conjunto en un contenedor herméticamente cerrado. Stanley construyó e instaló varios transformadores en Great Barrington y conectó el sistema para una distribución de 500 volt desde el laboratorio hasta el centro de la ciudad, distante 1,5 kilómetros. Para demostrar la posibilidad de transmisión eficiente a distancias más largas, empleó también transformadores para elevar la energía eléctrica a 3000 volt y a continuación reducirla hasta 500 volt antes de enviarla a la red de la población. La planta de Stanley entró en servicio el 16 de marzo de 1886. Fue un gran éxito, y Westinghouse siguió adelante, estableciendo instalaciones para la fabricación y venta de equipos de energía eléctrica de corriente alterna.

Edison y sus socios lucharon contra el sistema de corriente alterna, tanto en los tribunales como en la prensa, pero la suya era una batalla perdida. El motor polifásico inventado por Nikola Tesla facilitó una forma eficiente de utilizar la corriente alterna, y la invención por Shallenberger del medidor de watt-hora de corriente alterna hizo posible una facturación precisa del consumo de energía de los clientes. Estos dos inventos, junto con el bajo coste de transmisión de la corriente alterna, dio tal flexibilidad y comodidad al sistema de corriente alterna que relegó pronto los sistemas de corriente continua a unas pocas aplicaciones especializadas.

La siguiente década fue testigo del rápido crecimiento de la red de suministro eléctrico por corriente alterna, marcado por logros como el alumbrado de la feria mundial de Chicago, en 1893, y la instalación en las cataratas del Niágara de grandes generadores hidroeléctricos de 5000 caballos de potencia, de los cuales los dos primeros entraron en servicio en 1895. Junto con el asombroso crecimiento de la generación de energía eléctrica, vinieron grandes aumentos del tamaño de los



5. TIPICO TRANSFORMADOR MODERNO, sumergido en aceite para su aislamiento y refrigeración; suele hallarse encerrado en un tanque estanco. Las líneas de alimentación de alta y baja tensión se unen con las bobinas mediante bornes cerámicos. En el interior del transformador, las bobinas y el núcleo se hallan muy juntos para minimizar las pérdidas eléctricas y los costes materiales. El aceite refrigerante circula por convección a través de radiadores externos. En los transformadores grandes, la refrigeración se acelera acoplando unos ventiladores a los radiadores y haciendo circular el aceite por bombeo.



6. EL RECORRIDO DE LA ENERGIA ELECTRICA comienza en la central donde se genera electricidad a unos 22.000 volt (*izquierda*), que se aumentan para su transmisión en tendidos de alta tensión. Transformadores de reducción disminuyen la tensión hasta niveles apropiados para la distribución local y luego

transformadores. En 1895, un horno en la empresa Carborundum de Niagara Falls empleó un transformador con potencia nominal de 750 kV·A (kilovolt-ampère, una designación de la capacidad de admisión de potencia semejante a los kilowatt). Cinco años después, algunos transformadores tenían especificaciones de 2000 kV·A y funcionaban a 50.000 volt.

Podría creerse que el transformador construido a finales del siglo pasado era ya un producto maduro: las características esenciales del dispositivo han permanecido invariables hasta hoy. La verdad es que el transformador no dejó de evolucionar. Aunque es todavía un conjunto refrigerado y aislado de chapas de hierro y bobinas de cobre, las prestaciones del transformador han mejorado bastante desde 1900. Los prototipos modernos pueden funcionar a 765 kilovolt y admitir más de un millón de kV.A, con una vida de 25 a 40 años.

Estas mejoras dan testimonio del rendimiento de la investigación industrial, cuyo rápido crecimiento ha ido íntimamente asociado con el auge de la industria de la energía eléctrica. Los investigadores industriales, impulsados por un sistema competitivo que premia la máxima prestación al mínimo coste, buscan la comprensión de los fenómenos naturales para desarrollar nuevos productos y procesos y mejorar los viejos. La competición impulsa la eliminación de las limitaciones impuestas por los materiales e insta la creación de diseños y métodos de fabricación que se aprovechan de los materiales mejorados y de una intuición innovadora.

Los parámetros que caracterizan el transformador ideal dependen, en gran parte, de las propiedades del núcleo, y es en este campo donde se ha avanzado más. Las propiedades importantes del material del núcleo son la permeabilidad, la saturación, la resistividad y las pérdidas por histéresis. La permeabilidad, como se mencionó antes, se refiere al número de líneas de fuerza que produce un material en respuesta a una determinada influencia de magnetización; la saturación designa el punto en el que la capacidad del material para amplificar una fuerza magnetizante externa alcanza un valor constante. Estas dos propiedades definen la capacidad de admisión de potencia del núcleo. La resistividad eléctrica es deseable en el núcleo, puesto que minimiza las pérdidas de energía debidas a corrientes parásitas.

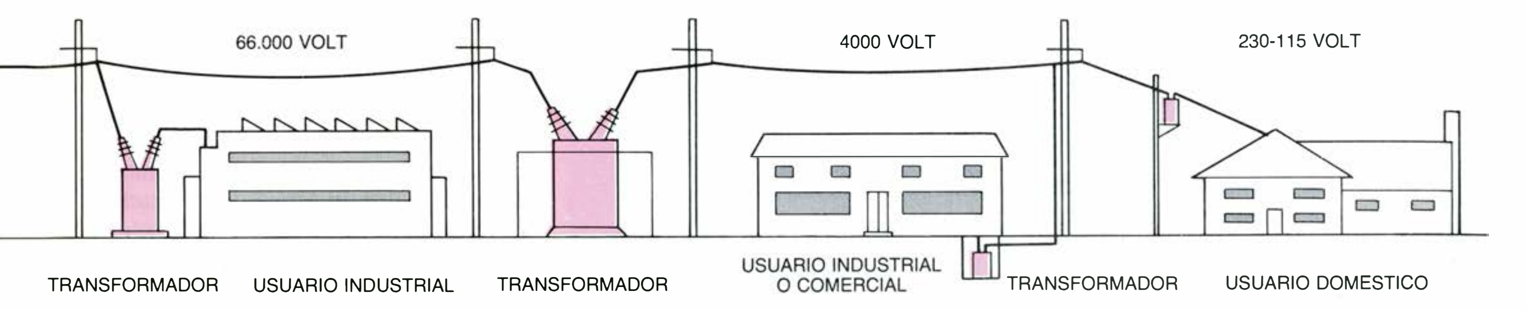
Por el contrario, la histéresis, el "efecto de memoria" de los materiales magnéticos, resta rendimiento al transformador. Debido a las interacciones entre grupos de átomos magnetizados, los efectos de la magnetización tienden a "permanecer" en el material; así, cuando se reduce una fuerza magnetizante temporalmente, el material no responde de inmediato. En un transformador, este retraso se traduce en desperdicio de energía durante cada ciclo de corriente alterna. A lo largo de la historia del desarrollo del núcleo, el el ingeniero ha buscado siempre aumentar la permeabilidad, la saturación y la resistividad, mientras se reducían las pérdidas por histéresis.

Una de las herramientas más importantes en este empeño es la curva B-H, que describe gráficamente la relación en un determinado material magnetizado entre permeabilidad, saturación e histéresis. Ilustra el número de líneas de fuerza inducidas en un material (B) en función de una fuerza magnetizante variable (H). La curva, que tiene forma de una S ancha con extremos puntiagudos, representa cada uno de los ciclos de la corriente alterna de excitación. Su pendiente corresponde a la permeabilidad; el punto en el que se nivela (parte superior de la S) es el valor de saturación, y el área bajo la curva (el área de la S) corresponde a la histéresis.

La meta del científico ha sido averiguar cómo se relacionan estas propiedades con la constitución física del hierro. Cada propiedad depende de las interacciones cooperativas de los átomos en imanes elementales, que se ven afectados por la estructura cristalina del hierro y por la presencia de otros elementos e imperfecciones. El estudio de estas complicadas interacciones se llama teoría de dominios; la información que se obtiene guía a los investigadores en su búsqueda de mejores materiales para los transformadores.

Las chapas delgadas de hierro dulce que integraban, en un principio, los transformadores Stanley-Westinghouse tenían sustanciales pérdidas por histéresis que se redujeron gradualmente, seleccionando hierros de fuentes especiales de fabricación, de manera que, hacia 1900, las pérdidas se habían reducido a la mitad. El envejecimiento del material era también un problema: las pérdidas por histéresis empeoraban progresivamente al envejecer el transformador.

En los primeros años del siglo XX, un metalúrgico inglés, Robert A. Hadfield, se dedicó a una larga serie de experimentos encaminados a determinar cómo la adición de otros elementos afectaba las propiedades del hierro. En varios artículos, Hadfield y sus colegas revelaron el potencial de una aleación de hierro y silicio, el ferrosilicio, como material del núcleo. Añadiendo silicio al hierro, se reducían las pérdidas por histéresis, aumentaba la permeabilidad, se eliminaba virtualmente el envejecimiento y crecía la resistividad eléctrica del metal. Pero no había forma de dominar la fabricación del ferrosilicio; pasaron siete años antes de que la compañía de Hadfield entregara su



la reducen todavía más para su utilización comercial o industrial a pequeña escala y para consumo doméstico. Aunque esta descripción esquemática es lineal, en la práctica las líneas de suministro se ramifican en cada reducción de tensión para establecer la red de distribución. (Dibujos de Hank Iken.)

primera tonelada de chapas de transformador. En los siguientes 17 años, el ferrosilicio ahorró a la industria unos 340 millones de dólares, una suma enorme en los años veinte.

El siguiente salto hacia delante en la tecnología del núcleo tuvo sus raíces en los primeros años treinta, cuando el metalúrgico americano Norman P. Goss, de la empresa Cold Metal Process encontró que, combinando la laminación y el tratamiento térmico del ferrosilicio, se obtenía una chapa con propiedades magnéticas sobresalientes en la dirección de la laminación. Goss no se dio cuenta de ello, pero el efecto del proceso era alinear los ejes principales de los cristales de hierro en la misma dirección, produciendo una interacción magnética cooperativa. Cuando un núcleo fabricado con este material se orientaba apropiadamente en un transformador, la saturación mejoraba en un 50 por ciento, las pérdidas por histéresis disminuían en un factor de cuatro y la permeabilidad se quintuplicaba.

De nuevo la traducción de ese descubrimiento en un método satisfactorio de producción de chapa de hierro constituyó un proceso largo y costoso. La Westinghouse Electric Company se asoció a la American Rolling Mill Company para desarrollar los procesos, como lo hicieron la General Electric y la Allegheny Ludlum Steel. El intercambio de patentes entre los dos grupos permitió a los fabricantes de transformadores aprovechar los progresos de ambos.

Imponer una orientación específica del metal en el núcleo requiere también cambios substanciales en la fabricación del núcleo. Ya no se puede troquelar una simple E de chapa de hierro; para obtener resultados óptimos, cada brazo de la E debe hacerse separadamente. Con todo ello, el descubrimiento de Goss no se comercializó hasta 1941. El efecto consiguiente sobre los transformadores fue notable.

Los sistemas de refrigeración y aislamiento eléctrico influyen también en las prestaciones de los transformadores. Ambos sistemas están íntimamente relacionados porque la cantidad de calor que generan el núcleo y los conductores determina la longevidad del aislamiento, y éste —sólido, líquido o gaseoso— sirve para disipar algo de calor. Las temperaturas dentro de una unidad de transformación alcanzan normalmente los 100 grados centígrados, el punto de ebullición del agua. En estas condiciones, el deterioro de los materiales aislantes puede limitar la duración de un transformador.

El aire suministraba el único medio de aislamiento y refrigeración en los primeros transformadores de Stanley; el algodón que cubría los cables servía, en su mayor parte, para mantenerlos separados. Poco después, George Westinghouse sumergió el transformador entero en un tanque de aceite, y separó las chapas del núcleo para que el aceite circulara entre ellas por convección. Las propiedades aislantes del algodón empapado en aceite se mostraron superiores a las del algodón seco en el aire; y se hizo moneda común una combinación de circulación del aceite y cierta variedad de material de celulosa, como el papel de embalaje, impregnado en aceite. Combinación que sigue empleándose hoy en día.

Aunque baratos y de reconocida eficacia como aislantes y refrigerantes, los aceites resultan inaceptables, en razón de su carácter inflamable, para las unidades situadas en el interior de edificios. Los líquidos de hidrocarburos clorados (PCB), introducidos en 1932, no son inflamables y gozaron de amplio uso, pero el reciente descubrimiento de que estos compuestos ejercen efectos tóxicos a largo plazo ha obligado a prohibir su uso. Algunos transformadores emplean aire o nitrógeno y aislantes vítreos; son esencialmente incombustibles y pueden instalarse en el interior de edificios. La rigidez dieléctrica del gas se incrementa a veces añadiendo pequeñas cantidades de fluorocarbonos. Otros transformadores secos dependen de un aislamiento de resina fundida obtenida de líquidos polimerizantes que se endurecen en sólidos de gran estabilidad.

Gracias al progreso técnico en la eliminación del calor, sobre todo, se ha avanzado en la reducción del tamaño global del transformador. Los transformadores aislados con aceite contaban, al principio, con la convección natural para que circulara el refrigerante; hoy disponemos ya de medios bastante refinados para disipar el calor del aceite. Muchas unidades poseen radiadores externos, refrigerados con ventilador, a través de los cuales el aceite circula por convección o bombeo.

Los ingenieros han venido experimentando también, durante muchos años, con la refrigeración por vapor: un líquido no conductor, con un punto de ebullición bajo, se evapora cuando entra en contacto con las partes calientes y se transporta en forma gaseosa a un compartimento separado donde se condensa. Funcionan ya varios transformadores que tienen sistemas de refrigeración por vapor, pero su coste no es todavía competitivo frente al de las unidades convencionales. Se está investigando activamente en esta técnica, de esperanzado futuro.

Cuando el transformador entra en su segundo siglo de servicio, no es fácil predecir cómo proseguirá su evolución. La investigación sobre metales amorfos (metales que carecen de estructura cristalina) ha descubierto algunas propiedades magnéticas muy prometedoras, pero aún han de encontrarse los métodos económicos de pro-

ducción de tales materiales. Para su estudio en laboratorio, se han construido transformadores superconductores, con bobinas sin resistencia eléctrica y cuya temperatura debe mantenerse a unos pocos grados por encima del cero absoluto, razón por la cual no tienen todavía aplicación práctica. Aunque estos experimentos prometen avances técnicos, el estado actual del mercado, que está paralizado debido a la saturación en la industria eléctrica, retrasará probablemente cualquier acción para cambiar de raíz la fabricación de los transformadores, aunque continuarán mejorándose el aislamiento y la refrigeración.

Cabría plantearse una cuestión final: ¿perdurará el transformador? Los circuitos de estado sólido han reducido, si no eliminado, la necesidad de transformadores en aparatos electrónicos pequeños como radios, equipos de sonido y televisores. Asimismo, la viabilidad de dispositivos de estado sólido mucho mayores ha posibilitado, en algunos casos, la transmisión de energía eléctrica de alta tensión como corriente continua, en lugar de corriente alterna, aunque se necesiten todavía transformadores en el proceso de conversión. Pero se trata de signos inequívocos de que llegará el día en que los dispositivos de estado sólido reemplazarán a los transformadores en algunas tareas de las redes de suministro eléctrico.

Los recientes adelantos en la superconductividad de alta temperatura han avivado la esperanza de encontrar materiales que fueran superconductores a temperatura ambiente. Si existieran, y pudieran transportar corrientes muy grandes, podría convertirse en realidad la distribución de electricidad como corriente continua de baja tensión, en vez de corriente alterna. Nadie tiene todavía ninguna idea acerca de cuándo se dará forma a esos materiales, ni siquiera si se encontrarán. Tampoco se sospecha qué incidencia económica tendría un cambio tan drástico en las redes de suministro eléctrico ya establecidas.

Ante esos avances, y tomando en consideración la impredecible historia del cambio tecnológico, resultaría arriesgado afirmar que el transformador perdurará para siempre. Sin embargo, parece muy probable que seguirá prestando sus servicios durante su segundo siglo de vida como lo ha hecho en el primero: silenciosa, eficaz y modestamente, manteniendo los sistemas de suministro eléctrico de los que depende gran parte de la vida moderna.

Juegos de ordenador

Submarinos diminutos surcarán venas y arterias merced a la nanotecnología

A. K. Dewdney

¿Llegará el día en que se inyecten en el cuerpo humano máquinas del tamaño de una mitocondria? Si la idea de que diminutas maquinitas se infiltren en nuestras carnes y repten por su interior nos pone la piel de gallina, parémonos a pensar en las posibles ventajas. Se podría lograr que esas máquinas microscópicas destruyeran organismos indeseables o eliminaran los depósitos de grasa que obstruyen nuestro sistema circulatorio. Con tales ingenios, el intervalo vital de las personas se alargaría.

Estas minúsculas máquinas sanadoras son fruto, en parte, de las reflexiones de K. Eric Drexler, actualmente profesor visitante del departamento de ciencias de cómputo de la Universidad de Stanford. Drexler ha estado trazando durante más de un decenio las líneas maestras de la nanotecnología, idea revolucionaria que propone la construcción de máquinas cuyos tamaños se medirían en nanómetros (milmillonésimas de metro). Ha diseñado engranajes y cojinetes de dimensiones atómicas y ha descrito dispositivos capaces de manipular moléculas individuales. Ha esbozado incluso la lógica en que debería fundarse un nanoordenador, que será el plato fuerte de la excursión de este mes. Aunque la nanotecnología no pase hoy de ser un sueño capaz de hacer brillar los ojos de Drexler y de un reducido puñado de especialistas, va orlada de una curiosa aureola de inevitabilidad. Lo que en el futuro pueda depararnos deja pequeñas en un orden de magnitud las más osadas maravillas de la ciencia ficción.

No ha sido Drexler el primero en hollar el campo de la nanotecnología. En 1959, Richard P. Feynman imaginaba una sucesión de máquinas construidas a escalas progresivamente menores; las máquinas de cada orden de magnitud se encargarían de fabricar las de escala inmediatamente inferior. Según Drexler, las piezas móviles de los productos últimos no tendrían sino unos pocos átomos de sección. Tales productos, en función de su diseño y su finalidad, podrían vagar por el interior del cuerpo humano, invadir las células cancerosas y reordenar su ADN. Otras máquinas —láminas metálicas apenas visibles— pulularían por las obras de edificación. En pocos días iría cobrando forma un elegante edificio.

Drexler está convencido de que un paso crucial en el desarrollo de la nanotecnología es la creación de "ensambladores", máquinas diminutas capaces de dirigir la formación de enlaces químicos por manipulación de las moléculas reaccionantes. Debidamente programadas para llevar a cabo determinadas tareas de construcción, los ensambladores fabricarían máquinas específicas en diminutas cadenas de montaje. Cada hora, factorías completas no mayores que un grano de arena podrían generar miles de millones de ingenios que, en su regular salida por las puertas de la fábrica, semejarían un chorro de polvo, o una solución lechosa suspendida en agua.

Existen ya en la naturaleza nanomáquinas acuáticas (cuando menos un cierto tipo de ellas). Pensamos en el conocido bacteriófago *T*4, que obtiene copias de sí mismo por el procedimiento de invadir el cuerpo de un hospedador bacteriano. El fago empieza anclándose en la pared celular externa de la bacteria y, a modo de diminuta jeringuilla hipodérmica, inyecta luego su ADN en la célula hospedadora. El ADN del fago reorganiza la síntesis bacteriana de proteínas e induce la elaboración de centenares de minúsculas piececillas del fago. En los encuentros que se producen al azar, esos componentes proceden a ensamblar por sí mismos las nuevas jeringuillas cargadas de ADN que, tan pronto se desintegra la pared bacteriana, quedan en libertad para ir en busca de nuevas víctimas.

Otro de los ejemplos de nanomaquinaria forma parte de ciertas bacterias flageladas. Los flagelos son largas estructuras helicoidales que sobresalen de uno o de ambos extremos de la bacteria. Estos organismos nadan haciendo girar el flagelo, que, cual sacacorchos, se agita rápidamente en movimiento circular. Un motorcito secreto situado justo en el interior de la pared celular bacteriana tiene a su cargo la rotación del flagelo. El motor consiste, fundamentalmente, en un rotor proteico impulsado por fuerzas iónicas.

Un dispositivo clave en cualquier ingenio nanotecnológico es el cojinete. De ordinario, los cojinetes requieren algún tipo de lubricante. Feynman señalaba en 1959 que "la lubricación comporta algunas facetas interesantes. La viscosidad del aceite iría creciendo progresivamente al descender [de escala]... ¡pero en realidad no habría necesidad alguna de lubricante! Disponemos de muchísima fuerza suplementaria. Que los cojinetes trabajen en seco; no podrán calentarse, porque, en un dispositivo tan pequeño, el calor se evacuaría muy, muy rápidamente."

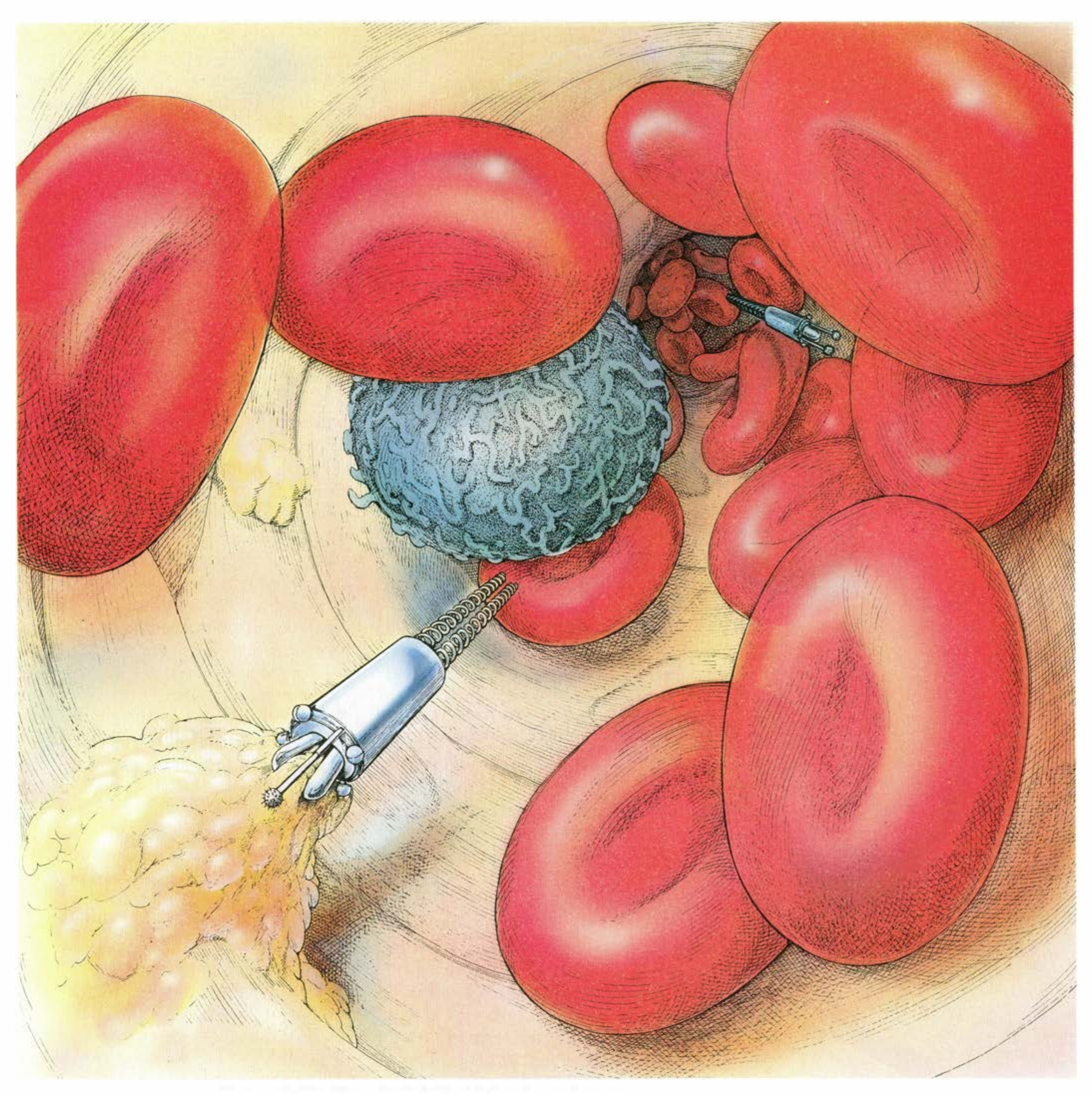
"¿No serviría acaso un lubricante más ligero? Incluso sustituyendo el aceite por keroseno, la viscosidad aumentaría. Más todavía, como ha hecho notar Drexler, "desde la perspectiva de una nanomáquina típica, una molécula de keroseno no es un lubricante, sino un objeto". En un artículo dedicado a engranajes y cojinetes, Drexler examina el problema del rozamiento en los cojinetes de rodillos. A causa de lo que podríamos denominar abultamientos atómicos, sería de esperar que los cojinetes de rodillos de tamaño nanométrico experimentasen una considerable fricción estática y dinámica. Los abultamientos de que hablamos están descritos, al menos en parte, por una fórmula denominada potencial de interacción de van der Waals. La fórmula contiene un término exponencial que expresa una fuerza de repulsión entre los átomos, responsable de casi todos los abultamientos.

Drexler sugiere que el problema del rozamiento podría resolverse utilizando cojinetes de rodillos en los que se indentasen mutuamente átomos superficiales, dispuestos en hileras, con hileras similares del canal de rodamiento, que es la pista sobre la cual corren las bolas o rodillos de los cojinetes. Un ensamblador capaz de colocar átomos de elementos químicos, carbono y flúor, por ejemplo, podría construir el cojinete y la banda a partir de átomos de carbono dispuestos según la estructura de enlaces simples típica del diamante. El cojinete consistiría entonces en una lámina curvada hacia atrás y sobre sí misma formando un cilindro hueco. Tanto la superficie del cojinete como la pista de rodadura estarían tachonadas

de átomos de flúor dispuestos en hileras al bies [*véase la figura 2*]. Idéntica estrategia permitiría la construcción de ruedas dentadas capaces de engranar debidamente.

Drexler se ocupa igualmente del rozamiento que se produce al deslizarse una sobre otra dos superficies atómicas. Dotados de la capacidad de disponer a voluntad los átomos en las posiciones que queramos, sin infringir las leyes físicas, podemos valernos de configuraciones que suavicen las fuerzas repulsivas de van der Waals. Por ejemplo, un átomo que se moviera en las cercanías de una superficie compuesta por hileras de otros átomos adecuadamente ensamblados podría recorrer trechos relativamente libres de saltos, si bien para ello tendría que seguir una trayectoria rectilínea situada justamente sobre el surco definido por dos hileras contiguas. Son muchas más las ideas que bullen en Drexler. Algunas de ellas sólo están recogidas en artículos técnicos, que Drexler ha tenido la amabilidad de poner a disposición de los lectores interesados en saber más sobre las tuercas y tornillos, hipotéticos por ahora, de la nanotecnología. Pueden solicitarse esos artículos al Foresight Institute, P.O. Box 61058, Palo Alto, California 94306. Los lectores que envíen 3,50 dólares recibirán un lote de cuatro artículos referentes a diversos aspectos de la nanotecnología. Se encontrará una panorámica más general de este campo en el libro de Drexler *Engines of Creation* [véase "Bibliografía"].

Imaginemos por un instante que en verdad fuera posible algo similar al diminuto submarino vascular que mencioné anteriormente. ¿Cómo se controlaría? Mediante un nanoordenador, evidentemente; pero ¿de qué clase? Tal vez fueran posibles los ordenadores electrónicos, dice Drexler, pero se ha

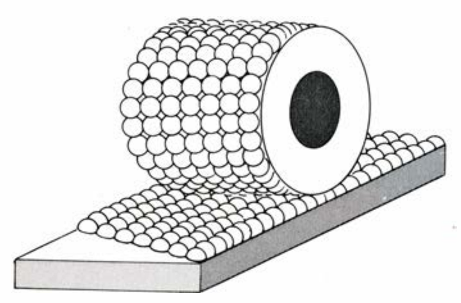


1. Nanomáquina en pleno ataque a un depósito graso mientras avanza por un capilar

concentrado en computadoras mecánicas basadas en lo que denomina "lógica de varillas". Aunque sus operaciones lógicas están enteramente mediadas por varillas moleculares que se deslizan a través de una matriz diminuta, no son nada lentas. Por ser de escala atómica, tales varillas sólo invierten unos 50 picosegundos (billonésimas de segundo) en su deslizamiento.

El elemento principal de todos los ordenadores es la puerta lógica. A una puerta lógica llegan señales por una o varias sendas; de ella sale una senda, que más tarde puede escindirse en varias. Las señales son de dos tipos, denotados 0 y 1. Dado que la señal de una senda dada varía en el tiempo de uno a otro valor, podría utilizarse una variable, x por ejemplo, para rotular la senda. La función lógica de la puerta queda entonces descrita por una fórmula. Por ejemplo, la fórmula "x e y" describe la llamada puerta y; en ella, la salida de la puerta es 1 si y solamente si las señales de entrada, x e y, son ambas 1. Análogamente, la fórmula "x o y" describe la puerta o. En este caso, la salida de la puerta es un 1 en cuanto al menos una de las señales de entrada, x o y, sea un 1. A partir de puertas de estos dos tipos, más una tercera, denominada puerta no, o inversor, puede construirse cualquier función lógica arbitraria. La puerta no transmuta 1 en 0 y 0 en 1.

En los ordenadores de nuestros días, las puertas lógicas están formadas por transistores de escala micrométrica, implantados sobre la superficie de una minúscula laminilla de silicio, llamada pastilla, o "chip". Un primer estrato de silicio, sometido a tratamientos especiales para infundir en él impurezas portadoras de exceso o defecto de electrones, se recubre con una capa de silicio policristalino. Estas dos primeras láminas están cubiertas por una tercera, metálica, normalmente de aluminio. La tercera capa establece las interconexiones eléctricas entre los transistores. Como es obvio, la superficie de la laminilla no presenta las tres capas en todos sus puntos. En realidad, la configuración en que se hayan organizado las capas define precisamente los transistores y sus interconexiones. La capa metálica, por ejemplo, consta de tiras de alumino ultraestrechas que corren por la superficie.



2. Cojinete de diamantes fluorados

En un microcircuito, las señales que recorren las microscópicas pistas de aluminio saltan de una a otra entre dos tensiones eléctricas bien determinadas, que representan a los valores lógicos 0 y 1. Las puertas son, por lo general, no-y, expresables por medio de las funciones lógicas simples antes mencionadas gracias a la fórmula "no(x e y)". Dicho de otro modo, la puerta no-y produce salida 1 salvo cuando ambas entradas, x e y, sean 1. Por tanto, de ser igual a 0 alguna de las dos entradas, la salida es 1. Utilizando exclusivamente puertas no-y se puede construir cualquier función lógica, por complicada que sea.

Los microcircuitos son verdaderamente pequeños. Las dimensiones de sus componentes se expresan en micrometros. ¡Y Drexler nos pide que imaginemos un ordenador que cabría completo dentro de uno de los actuales transistores de silicio!

Las operaciones lógicas del hipotético nanoordenador de Drexler no se efectúan mediante hilos portadores de unos determinados valores de tensión eléctrica, que codifican al 0 y al 1, sino mediante varillas infinitamente pequeñas. Imaginemos una varilla de dimensiones atómicas con libertad para deslizarse entre dos posiciones. Serán ahora las posiciones de la varilla las que, por convenio, codifiquen los valores 0 y 1. La varilla está hecha de carbino, una cadena de átomos de carbono unidos, alternativamente, por enlaces sencillos y triples. El carbino resulta suficientemente fuerte y rígido para la tarea, pero puede curvarse sobre esquinas redondeadas y conserva la capacidad de deslizarse. A todo su largo, las varillas de carbino presentan ciertas protuberancias, a modo de pomos. Existen dos variedades de pomos [*véase la figura 3*]. Algunos se limitan a sobresalir (pomos de tanteo), mientras que otros presentan un aspecto más parecido a paneles o puertas (pomos de bloqueo).

La base de ambos tipos de pomo consiste en un anillo hexagonal de piridazina, encadenado por uno cualquiera de sus lados a la cadena de carbino. Los pomos de tanteo constan de un segundo anillo de carbonos situado sobre el anillo de piridazina. El anillo superior contiene un único átomo de flúor en posición prominente, presto a actuar de sonda lógica. Los pomos de bloqueo se diferencian ligeramente de los de tanteo, pues están coronados por un anillo de tiofeno fluorado. Pero los nombres carecen aquí de importancia. Daremos por supuesto en lo sucesivo que esas estructuras son capaces de desempeñar las tareas de tanteo y bloqueo. Baste decir que Drexler ha calculado sobre el tema mucho más de lo que el espacio disponible me permite comentar, especialmente en lo relativo a la tensión que han de tener las varillas para soportar la agitación térmica.

Además de sus varillas, el corazón lógico de la nanocomputadora mecánica consta de una matriz tridimensional construida con átomos próximos al carbono en la tabla periódica. Se trata de un armazón surcado y penetrado por canales que corren en dos direcciones perpendiculares, y ello, en gran número de niveles. ¿Cómo calculan las varillas las funciones lógicas en el interior de la matriz?

Imaginemos una única varilla horizontal que descansa en su canal, en una de las dos posiciones permisibles. La llamaremos varilla lógica y supondremos, por mor de sencillez, que tiene dos pomos de tanteo y uno de bloqueo [*véase la figura 4*]. Así pues, la varilla pasa a través de tres cerrojos, partes huecas de la matriz donde se interceptan en ángulo recto dos varillas (y sus pomos). En cualquier cerrojo dado, la cuestión planteada es la de si el pomo de tanteo se deslizará fácilmente, y rebasará el pomo de bloqueo, o si quedará retenido por él. De los tres cerrojos que atraviesa la varilla lógica de nuestro ejemplo, los dos situados más a la izquierda contienen pomos de bloqueo sujetos a varillas verticales rotuladas x e y. El cerrojo de la derecha contiene un pomo de tanteo, unido a una tercera varilla vertical rotulada f.

La varilla horizontal y sus cerrojos sirven para computar la operación no-y. Las dos varillas verticales de la izquierda codifican las variables de entrada x e y. La varilla vertical de la derecha representa la salida de la operación no-y.

Convengamos en que las varillas verticales que codifican las entradas denoten 0 en posición alta y 1 en posición baja. Supongamos que x sea 0 y que y sea 1; con otras palabras, que la varilla x se encuentre alzada y la y bajada. En tal caso resulta imposible desplazar hacia la izquierda la varilla lógica hasta rebasar ambas varillas verticales, porque la x está elevada; su pomo de bloqueo obstruye el paso del pomo de tanteo de la varilla lógica. Sólo en el caso de que también la varilla x se encuentre

baja tendrán paso libre los dos pomos de tanteo al encontrarse con los respectivos de bloqueo y podrá la varilla lógica deslizarse hacia la izquierda.

¿Y qué sucede con la varilla de salida, *f*? Puede verificar si la varilla lógica ha alcanzado su nueva posición tratando de atravesar el cerrojo que debería estar ocupado por el pomo de bloqueo de la varilla lógica. Sucede que, cuando la varilla horizontal se encuentra a la derecha, la *f* puede deslizarse y pasar del valor lógico 0 al 1. Pero cuando la varilla lógica se encuentra a la izquierda, su pomo de bloqueo impide que el pomo de tanteo de *f* atraviese el cerrojo, y *f* tiene también el valor 0. Así, *f* vale 1 si *x* e *y* no son ambos 1, como estipulan las reglas de la función no-y.

El ciclo computacional de ordenador de varillas de Drexler contempla tres fases distintas, que se siguen repetidamente una a la otra a la velocidad del rayo. En la primera fase se disponen los cerrojos denotativos de entradas tirando temporalmente de los extremos de todas las varillas de entrada. Tal proceder permite arrastrar a sus posiciones iniciales a todas las varillas lógicas. En la segunda fase, todas las varillas de entrada adoptan las posiciones que les correspondan. Las varillas de entrada podrían hallarse conectadas a diversos sensores de la nanomáquina, o a salidas de la propia nanocomputadora. Después, una fuente de desplazamiento tira de todas las varillas lógicas hacia la izquierda. Las varillas con libertad de movimiento se desplazan en consecuencia.

A buen seguro que los investigadores en inteligencia artificial habrán de poner objeciones en este punto. Pues, aún concediendo que tan diminuto paquetito estuviera provisto de la energía adecuada para la computación, ¿cómo se propone Drexler dotar a sus minúsculos vehículos autónomos de la conducta inteligente precisa?

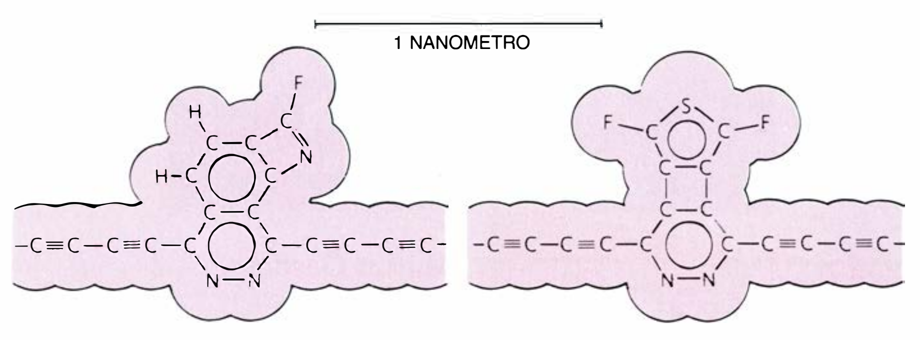
Drexler replica que, a pesar de que se podrían alojar unidades centrales de procesamiento verdaderamente potentes en espacios reducidos en extremo, la verdad es que, después de todo, bastantes de sus nanomáquinas conceptuales no tendrían por qué ser terriblemente inteligentes. Tomemos una de las máquinas curativas, el submarino antes descrito. El ingenio viaja por el torrente circulatorio, absorbiendo oxígeno y glucosa, productos químicos que le suministran energía. Es de presumir que quienes albergasen en sí varios miles de millones de estas navecillas se sintieran de vez en cuando un tanto agotados. En cualquier caso, cada submarino emplearía la energía de sus glucomotores (que en este momento están diseñándose) para mover dos propulsores helicoidales. Carecería de sistema de guía. Cuando chocase contra algo, el nanoequivalente de un interruptor de contacto instalado en sus sensores de proa le informaría del acontecimiento. El mismo sensor trataría entonces de detectar coincidencias de formas en el nivel molecular, comparando las configuraciones plasmadas sobre el sensor con una serie de plantillas.

En el caso de que el submarino detectase paredes celulares, glóbulos rojos, leucocitos, o cierto número finito de otras entidades benignas, daría marcha atrás por un instante y luego proseguiría su camino. En cambio, si se tropezase con una bacteria hostil o con un virus, abriría sus mandíbulas mecánicas para engullir tanto como pudiera de lo que allí hubiera encontrado. Entre esos objetos extraños se contarían los depósitos de grasa y prácticamente cualesquiera otros para los que hubiera sido programado [*véase la figura 1*]. Lo engullido, sea lo que fuere, se fragmentaría y devolvería al torrente circulatorio para su eliminación por los riñones. Las probabilidades de que cuerpos indeseables pudieran sobrevivir más de unas pocas horas en una corriente sanguínea tan activa serían verdaderamente escasas.

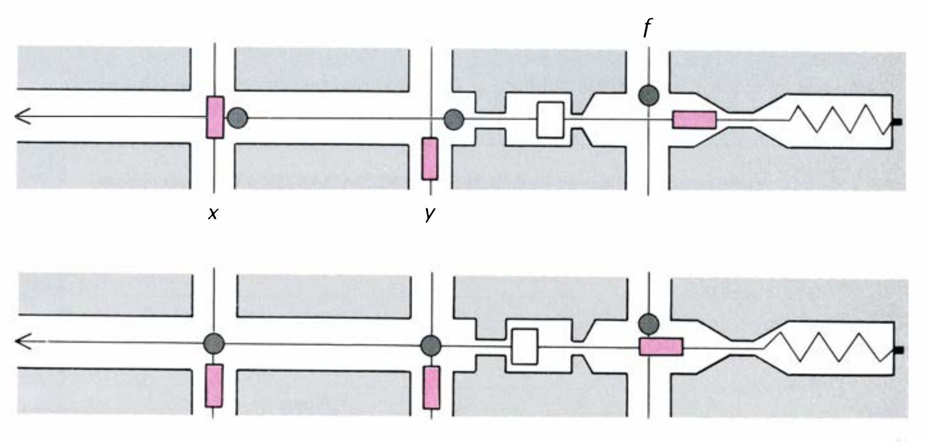
Por supuesto, se trata de un sueño, al menos por ahora. Estamos apenas en el umbral de una posible zambullida en el reino de lo nanométrico. ¿Será posible que Drexler tenga razón cuando afirma que podría darse algo cercano al sueño? Drexler está habituado a defender sus ideas y en ocasiones a modificarlas, a la luz de objeciones serias de colegas científicos. No obstante, sigue siendo un técnico sin tecnología, un especulador culto cuya máxima aportación podría consistir en estimular los sueños que guían nuestro desarrollo tecnológico. Y en ello no se cuenta entre quienes propugnan avanzar a ultranza. Los peligros derivados del abuso de esta tecnología hacen palidecer los de las armas atómicas y las aberraciones que pueda producir la ingeniería genética.

Un nanoentusiasta me aseguró recientemente que "miles de los que hoy viven jamás morirán!" Aunque la relación parezca un poca traída por los pelos, la verdad es que un predicador le hizo a mi padre una manifestación exactamente igual hace medio siglo.

En el artículo de noviembre sobre el programa de planificación de fiestas de Rich Gold intervenían cierto nú-



*3. Pomo de tanteo (*izquierda*) y pomo de bloqueo (*derecha*) de una varilla lógica de carbino*



4. Varilla lógica que define la operación no-y

mero de hipotéticos invitados a un guateque celebrado en un ordenador personal. La escena de la reunión era un retículo cuadriculado sobre la pantalla de presentación. Los invitados se movían de una a otra casilla en busca de felicidad. Cada uno de ellos quería hallarse a una determinada distancia de cada uno de los restantes invitados y en cada ciclo daba un paso en la dirección que hiciera mínima la infelicidad total de la disposición actual. La suma de las diferencias entre las distancias existentes en cada momento y las deseadas constituía una medida de la infelicidad.

El ciclo básico del programa era lo más sencillo posible. Los asistentes a la fiesta se movían de uno en uno. Según Arthur Charlesworth, de la Universidad de Richmond, tal sencillez puede distorsionar un tanto las celebraciones. Charlesworth ha estudiado un dispositivo de programación en paralelo llamado la "cita multivía". Si cada uno de los invitados estuviera representado por un proceso de un lenguaje de programación en paralelo, al final de cada iteración "todos los procesos mencionados celebrarían una 'reunión' para compartir la información relativa a las nuevas posiciones de los invitados". Cabe eliminar la distorsión de nuestro medio secuencial todavía habitual no moviendo los invitados hasta haber calculado la infelicidad de todos y cada uno de ellos.

Arthur D. Penser, de Hunstville, Alabama, no encontró feliz la función de infelicidad. Por su parte, prefiere celebrar fiestas donde se eleven al cuadrado las diferencias entre las distancias actuales y las ideales. Dados unos mismos invitados situados en las mismas posiciones iniciales, ¿hasta qué punto se diferenciarían de las anteriores tales fiestas? Como es obvio, se verían mucho más fuertemente dominadas por las diferencias extremas. La ausencia elevaría al cuadrado la nostalgia de los corazones solitarios.

Como ya dije hacia el final de aquel artículo, cierta ciencia estudia ese tipo de cuestiones: la llamada proxemia. William Ickinger, Jr., de la Universidad de Maryland, construyó en cierta ocasión una malla hexagonal con la que, extendida sobre el suelo, estudiaba en condiciones controladas las distancias interpersonales de las reuniones. Ickinger está fascinado por el tema de los programas de simulación de reuniones y le gustaría mantener correspondencia con quienes compartan ese mismo interés. La dirección de Ickinger es 430 Ringwald Street, Chillicothe, Ohio 45601, Estados Unidos.

Taller y laboratorio

¿Cómo explicar ciertas ilusiones de contornos subjetivos, manchas brillantes sin existencia real?

Jearl Walker

Si el lector mira la figura 1, entera, sin centrarse en ninguno de los lados del triángulo quebrado, verá un triángulo ilusorio de un color blanco opaco, que aparenta ocultar parcialmente tres círculos negros y un perímetro triangular. Ese triángulo ilusorio, que puede tardar algunos segundos en manifestarse, llega a apreciarse más brillante que el fondo blanco. (La ilusión puede reforzarse deslizando una hoja de papel oscuro debajo de la página, para eliminar así la interferencia de lo impreso en la otra cara.)

El triángulo opaco constituye un ejemplo de cierto grupo de ilusiones llamadas contornos subjetivos, sobre las que llamó la atención Gaetano Kanizsa, de la Universidad de Trieste, en 1976. En su honor, las variaciones de los dibujos que generan triángulos ilusorios se denominan triángulos de Kanizsa.

¿A qué obedece la aparición del triángulo ilusorio? ¿Por qué es más nítido que la zona que lo rodea? Durante más de veinte años, y pese a los esfuerzos concentrados de fisiopsicólogos y expertos de otras disciplinas, nadie ha podido brindar respuestas definitivas a tales cuestiones. (Es fácil construir dibujos que generen contornos subjetivos; el lector podría intentar incluso descubrir figuras nuevas o comprobar las causas que las originan.)

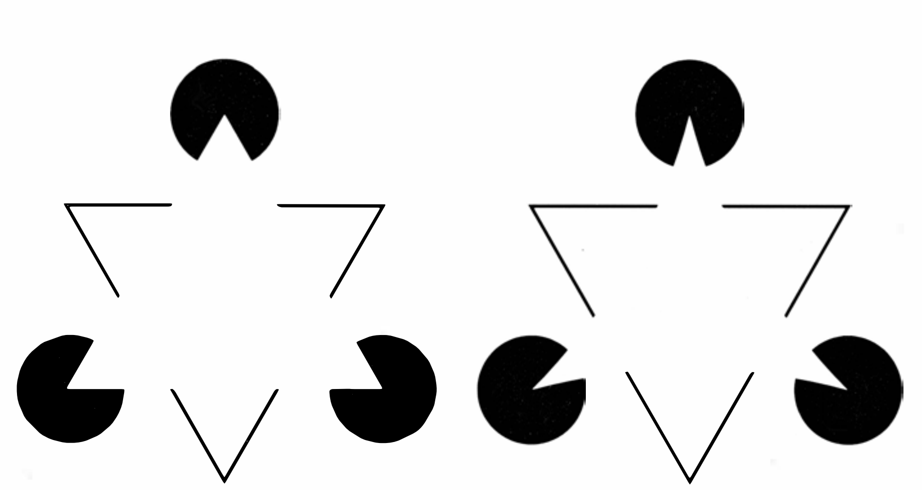
En una primera explicación se apeló al contraste de brillos dentro del dibujo de Kanizsa. De acuerdo con la misma, al contrastar los vértices del triángulo blanco con los círculos negros incompletos, aquéllos se percibían más claros de lo que eran en realidad, claridad que se difundía hasta afectar todo el triángulo ilusorio. Pero esta explicación se vino abajo enseguida. Si dibujamos el triángulo ilusorio con trazo fino, sacándolo así del ámbito subjetivo, desaparece la claridad o, por lo menos, se debilita y escapa al observador inexperto. Pero el contraste de brillo no disminuye en la zona de los vértices del triángulo. La teoría del contraste de brillos falla, asimismo, porque tampoco explica la razón por la cual las demás zonas blancas que rodean a los círculos incompletos no ganan claridad; y ello, a pesar de que su contraste con los círculos en nada desmerezca el mostrado por las "cuñas" suprimidas.

Otra justificación de primera hora recurría a las partes del sistema visual responsables de la detección de líneas, bordes y orientaciones. ¿Podrían interactuar esas partes para provocar la ilusión de un triángulo claro y completo en un dibujo de Kanizsa? Por atractiva que sea esta explicación, no aclara por qué los contornos subjetivos se ven a veces con mayor facilidad en las figuras borrosas o mal iluminadas.

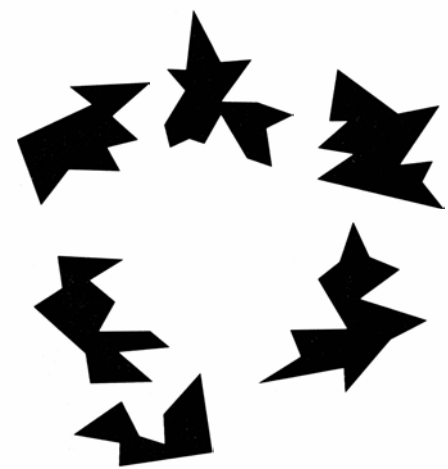
A una parte diferente del sistema visual se le atribuye la tarea de detectar la repetición de líneas; lo que ocurre, según parece, a través de un proceso análogo al análisis de Fourier. ¿Podría ese análisis añadir líneas suplementarias suficientes para completar una imagen subjetiva? No parece que tal análisis pueda ser el origen de la ilusión, puesto que se han creado contornos subjetivos en dibujos carentes de la repetición necesaria para inducirlo.

En 1986, Stanley Coren, de la Universidad de Columbia Británica, Clare Porac, de la Universidad de Victoria, y Leonard H. Theodor, de la Universidad de York, examinaron y rechazaron estas explicaciones, que implicaban uno y otro origen fisiológico. Se mostraron, en su lugar, partidarios de una segunda categoría de explicaciones que hacían intervenir procesos cognoscitivos. Por ejemplo, podríamos percibir un triángulo subjetivo porque nuestro cerebro busca automáticamente maneras de encerrar ciertas zonas y dar así sentido a una figura nueva y desconocida. Otra posibilidad es que aparezca el triángulo porque contemplemos el dibujo cual si fuera un rompecabezas que debamos resolver percibiendo en él figuras o siluetas familiares.

Coren había defendido ya la presencia de un mecanismo cognoscitivo muy fuerte, que participaría en los dibujos creadores de contornos subjetivos, y en el que intervendría la profundidad aparente de tales dibujos. Adviértase que, en el caso del triángulo de Kanizsa, la figura subjetiva parece encontrarse de-



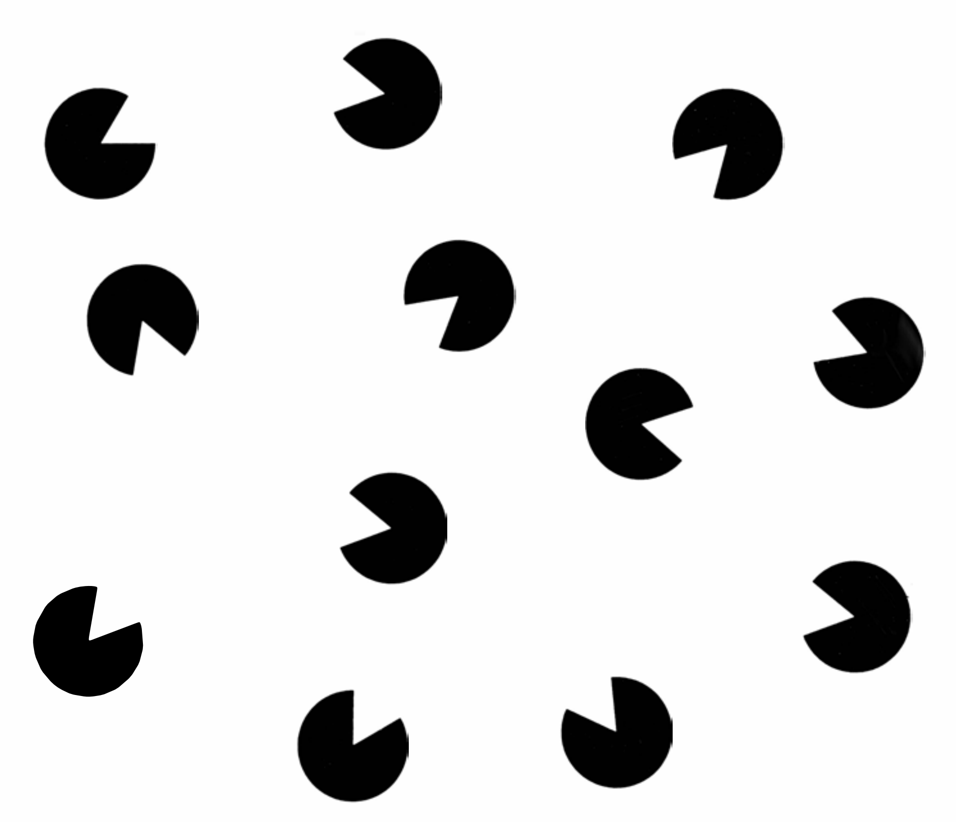
1. Triángulo de Kanizsa *2. Triángulo subjetivo de lados curvos*



3. Triángulo en un dibujo "ruidoso"

lante de las otras, obstaculizando parcialmente nuestra visión de las mismas. ¿Por qué aumenta la claridad del triángulo cuando se percibe profundidad en el dibujo? Sobre la respuesta nadie está de acuerdo, pero podría muy bien ocurrir que la claridad nos ayude a racionalizar la percepción del triángulo, del que sabemos su inexistencia. Coren ha propuesto, asimismo, otro mecanismo cognoscitivo que podría desempeñar un papel importante en los contornos subjetivos. Cuando en un dibujo percibimos una figura ilusoria, recurrimos a experiencias anteriores, aun cuando no seamos conscientes de ello. Llamaremos grupo perceptual al conjunto de experiencias anteriores. Viniendo a nuestro ejemplo, en cuanto hayamos aprendido a mirar el triángulo de Kanizsa, no tardaremos en apreciar una representación triangular de lados curvos en la figura 2.

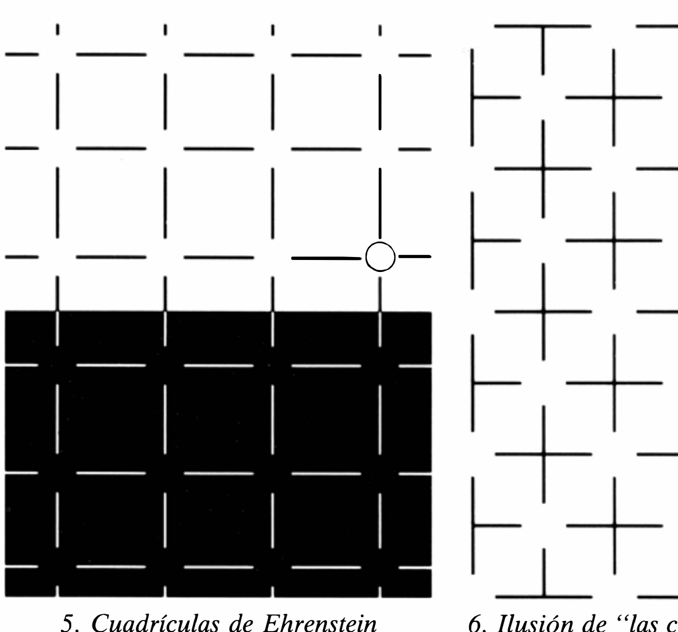
Una prueba más contundente la aporta la figura 3, tomada de experimentos sobre los que informaron, en 1979, Irvin Rock, de la Universidad de Rutgers, y Richard Anson, en Rutgers también entonces. Este dibujo es una ampliación de los trabajos anteriores de Coren. Tapando los dos primeros dibujos, solicítese a alguien no familiarizado con los contornos subjetivos que examine el tercero. Es improbable que este observador distinga algún triángulo ilusorio en el centro del dibujo o que aprecie en él una claridad insólita. Seguidamente, dénse a conocer al observador los dos primeros dibujos. Es más que probable que sí reconozca un triángulo ilusorio, nítido, en el tercer dibujo. La ilusión puede tardar en manifestarse decenas de segundos. Si el origen de esta ilusión fuese fisiológico y no cognoscitivo, no habría quizá retraso. ¿Puede el lector descubrir alguna figura ilusoria en la figura 4, adaptada también de investigaciones de Rock y Anson?



4. ¿Se aprecia aquí alguna figura subjetiva?

En las cuadrículas incompletas de la figura 5 se ofrece un tipo de ilusión diferente. El pionero en su investigación fue W. Ehrenstein; y, en su honor, lleva hoy su nombre. Si el lector evita la fijación, verá un círculo, cuadrado o gota en los puntos donde las líneas se cortarían si las cuadrículas se completaran. Las figuras son especialmente claras en la cuadrícula de líneas negras y especialmente oscuras en la cuadrícula de líneas blancas. En ambos casos, las figuras parecerán probablemente, encontrarse encima de la cuadrícula, aparentando ocultar las intersecciones de las líneas. La ilusión se manifiesta también si se examina una célula aislada de la cuadrícula, con una sola intersección incompleta. Ahora bien, si fijamos la vista exactamente en la zona de intersección, la porción clara u oscura desaparece. Se evapora, asimismo, colocando un círculo en torno a la zona de la intersección. Una sorprendente variación de la ilusión de Ehrenstein puede observarse en la figura 6: además de los lunares claros en las zonas de intersección, se percibirán calles diagonales claras que enlazan los lunares.

¿Cómo explicar esos lunares y calles irreales? Los primeros podrían deberse al deseo de encerrar porciones del dibujo superponiendo mentalmente algo que enlace los extremos de las líneas a través de cada intersección inacabada. También podría ser que los lunares se debieran al contraste de brillo entre los extremos de las líneas y el espacio de la intersección inexistente. Cabe una



5. Cuadrículas de Ehrenstein

6. Ilusión de "las calles" de Ehrenstein

tercera posibilidad: que mentalmente atribuyamos profundidad al dibujo, transformando una ilustración plana en una cuadrícula cuyas intersecciones se presenten ocultas por pequeñas esferas, o bien, en el caso de las calles, por un reticulado superpuesto a la cuadrícula real. Me parece importante esta última explicación, porque, al examinar las ilustraciones, percibo una intensa sensación de profundidad.

A finales de los setenta, John M. Kennedy, de la Universidad de Toronto, creó una amplia diversidad de ilusiones que se dirían relacionadas con la ilusión de Ehrenstein. En el primero de los cuatro dibujos de la figura 7, una simple organización de líneas radiales crea la ilusión de que en el centro hay un círculo más claro. Sostiene Kennedy que la figura ilusoria se debe al contraste de brillos entre los extremos interiores de las líneas y el centro blanco. Según esta teoría, la zona inmediatamente contigua al extremo de cada línea parece más clara de lo que realmente es en razón de su proximidad a una línea oscura. En el caso de una línea aislada, esa ganancia de claridad resulta imperceptible; ahora bien, si se agrupan varias líneas de suerte que las zonas supuestamente claras se reúnan o solapen, esa mayor claridad se torna patente.

En los tres dibujos que siguen, las líneas se van reorientando progresivamente hasta colocarse tangentes a la zona central. A medida que la reorientación avanza, la ilusión de que el centro es más claro se debilita y termina por desaparecer. Según Kennedy, la reorientación de las líneas hace que las zonas que participan en el contraste de brillos se desplacen y salgan de la zona central. Cuando las líneas son tangentes, el espacio blanco inmediato al extremo de cada línea se encuentra junto a otra; entonces, ese espacio no adquiere, mentalmente, una claridad destacada, ni la zona central exhibe ya la ilusión original.

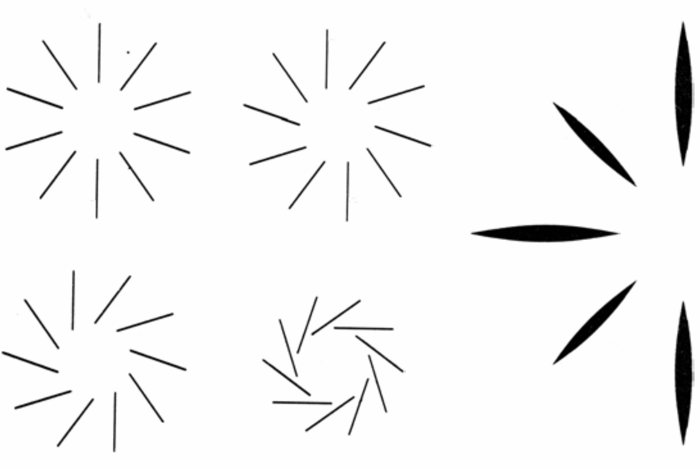
Quienes se oponen a esa hipótesis afirman que la ilusión no se debe a un contraste de brillos, sino a la conexión subjetiva de las líneas, que las hace atravesar la zona central, y a la percepción de profundidad en el dibujo: nos imaginamos que las líneas se cortan, aunque cada punto de corte queda oculto a la vista por una bolita clara, colocada encima. Si las líneas se reorientan, la idea de una unión oculta pierde viabilidad y la ilusión se desvanece.

Puedo añadir una observación en apoyo de esta teoría. Si la ilusión se debe a un contraste de brillos en el extremo de cada línea, ¿por qué no aparece más clara la zona inmediatamente contigua al extremo exterior de las líneas? Añadiendo incluso un gran número de líneas al dibujo, de suerte que las zonas afectadas inmediatamente contiguas a los extremos exteriores estén más cercanas, no se descubre mayor claridad ni ninguna figura ilusoria a extramuros de las líneas. Me atrae la idea de que en el dibujo deban percibirse profundidad y una intersección oculta para que se cree la ilusión de una figura central. Todos estamos acostumbrados a escenas en las que un objeto obstruye la visión de otros distantes; sospecho que lo que me ocurre es que concentro automáticamente ese grupo perceptual en los dibujos de Kennedy.

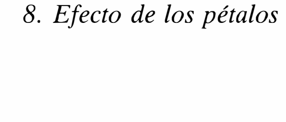
Oponiéndose a la teoría de la necesidad de una conexión oculta para crear la ilusión, Kennedy mostró que ésta permanece cuando se sustituyen las líneas por unas figuras en forma de pétalos, más anchas por el centro y aguzadas por las puntas [*figura 8*]. Estas puntas deben eliminar la tentación de imaginar una conexión oculta. Creo, sin embargo, que la ilusión de una figura central es bastante más débil en este dibujo que en el caso de las líneas, lo que viene a sugerir que, aunque acaso no fuera necesaria una conexión oculta, ésta desde luego ayuda.

Otro dibujo investigado por Kennedy se compone de "líneas" radiales que son hileras de puntos negros; los puntos se desvanecen hacia el extremo interior de cada línea. Una versión de este dibujo de Kennedy, ideada por Barry L. Richardson, de la Universidad de Toronto, se presenta en la figura 9. Las líneas son de trazo lleno, afiladas hacia la punta. Ambos dibujos crean la ilusión de un centro claro, como un sol. Un negativo fotográfico de uno y otro dibujo crea un centro oscuro, como si hubiera un agujero negro.

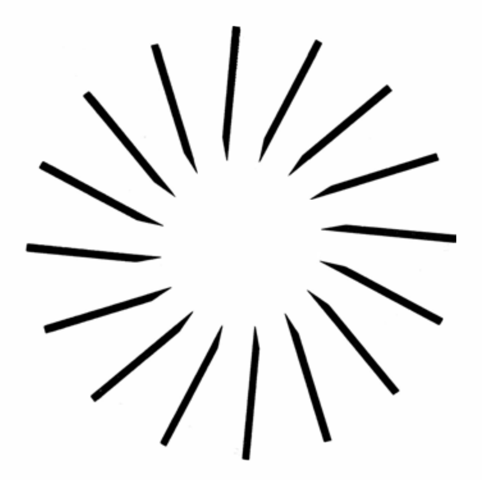
Un centro brillante e ilusorio se for-



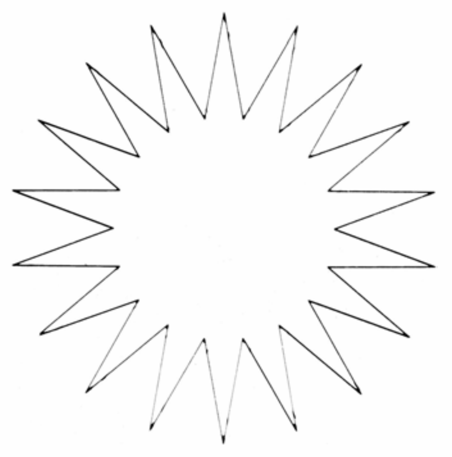
7. Efecto de la orientación variable de las líneas



8. Efecto de los pétalos



9. Efecto de líneas afiladas



10. Dibujo en forma de sol

ma también en el dibujo de Kennedy que evoca un sol estilizado [*véase la figura 10*]. Según Kennedy, el brillo se debe al contraste de luminosidad entre la zona central y los codos agudos que forman entre sí los segmentos rectilíneos. Este dibujo es importante porque la ilusión no sirve para conectar ni encerrar nada que en él pueda haber: los segmentos rectilíneos ya están conectados y el centro se halla completamente cercado. ¿A qué se deben estas ilusiones de Kennedy? ¿Al contraste de brillos? ¿Al grupo perceptual? ¿A la ilusión de profundidad y conexión oculta? ¿Son un deseo travieso de ver algo interesante en una ilustración anodina? Dejo esta cuestión en manos del lector.

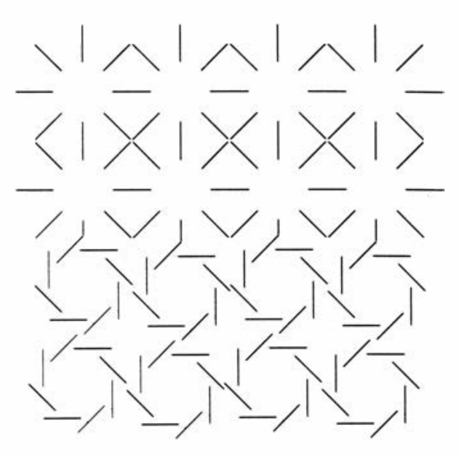
En 1983, Alex Stewart Fraser, de la Universidad de Cincinnati, presentó una combinación intrigante de dibujos de Kennedy y Ehrenstein. Al examinar la figura 11 desde una distancia de visión normal, la mitad superior produce zonas claras, como en la ilustración de Ehrenstein, mientras que la mitad de abajo no despierta ilusión alguna. Adviértase que está llena de líneas que podrían suponerse tangentes a zonas circulares, como en los dibujos de Kennedy. Estas zonas, sin embargo, no se aprecian ni aparece ningún brillo especial. Ahora, aléjese el lector de la ilustración. Cuando se encuentre a la distancia adecuada, las zonas brillantes de la mitad superior se habrán casi desvanecido, mientras que la mitad inferior ofrecerá zonas algo más oscuras de lo que deberían. La ilusión mejora mirando la figura de soslayo.

Fraser creó también el dibujo organizado de la figura 12. Casi imposible de percibir, si la ilustración se observa desde una distancia normal. Pero si el lector se aleja, aparecerá una figura levemente oscurecida, generada por los lunares rodeados de líneas tangenciales.

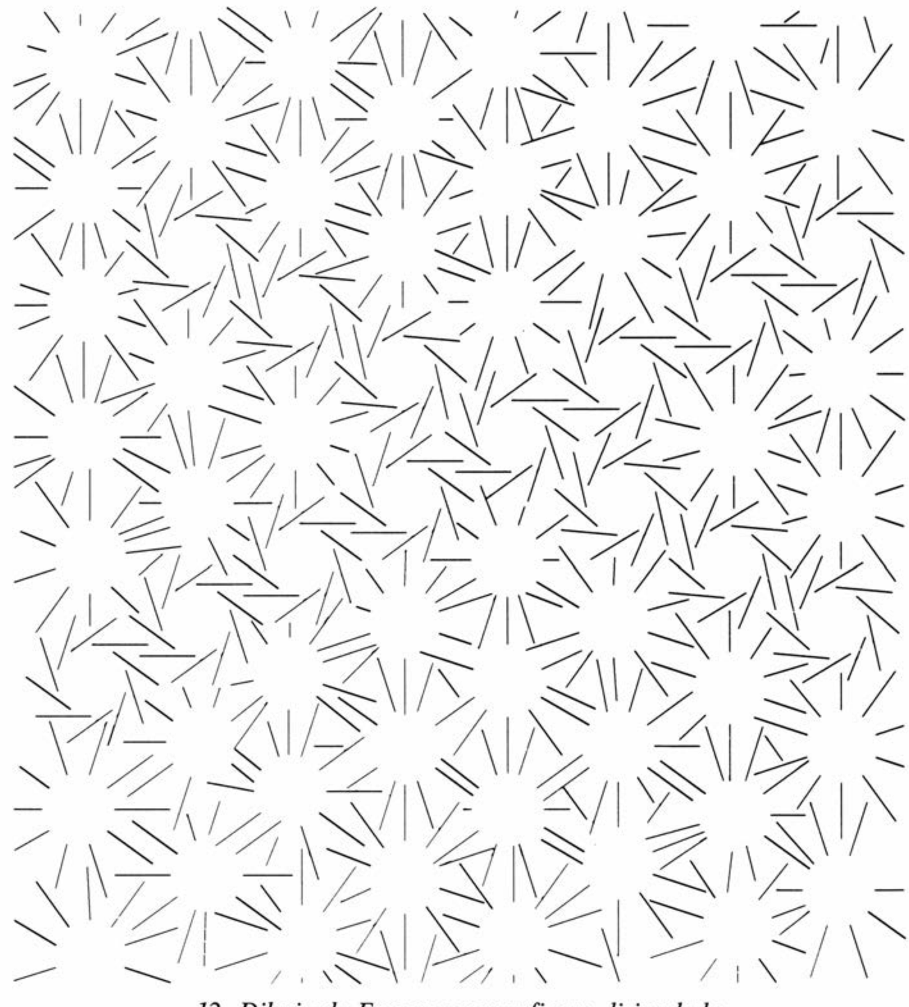
En 1981, Lothar Spillmann y Christoph Redies, del servicio de neurología de la Universidad alemana de Freiburg, expusieron cómo modificar la ilusión básica de Ehrentein superponiendo a la cuadrícula una transparencia con puntos repartidos al azar. En los lugares donde se encuentran normalmente los lunares claros, los puntos parecen agolparse con menor densidad que en las otras zonas. Da incluso la impresión de hallarse organizados en círculos concéntricos. Yo veo esas zonas combarse hacia arriba, como casquetes esféricos superpuestos sobre la cuadrícula. Pero faltan las zonas brillantes que produce la cuadrícula.

Cuando la transparencia se mueve de un lado a otro de la cuadrícula, los lunares "hierven" de actividad y se trasladan a nuevas posiciones en la dirección del movimiento. Este traslado puede deberse a una persistencia de visión asociada a los lunares. Del mismo modo, cuando la transparencia se arrastra de un lado a otro por encima de las cuadrículas de Ehrenstein que producen normalmente la ilusión de calles brillantes, éstas se mueven en la dirección del arrastre. Si se tira de la transparencia diagonalmente, en la dirección de un conjunto de calles, éstas cobran vida, mientras que las calles perpendiculares pueden desaparecer. Las transparencias con puntos distribuidos uniformemente o con rayados regulares, rectos u ondulados, no eliminan de la cuadrícula la ilusión de las zonas claras ni, cuando se mueven, desplazan tales zonas ilusorias.

Una ilusión similar puede producirse colocando la cuadrícula de calles de Ehrenstein sobre la pantalla de un televisor sintonizado a un canal sin emisión (mejor con un televisor en blanco y negro). Dentro de las zonas ilusorias de la cuadrícula, la "nieve" aleatoria de la pantalla parece arremolinarse en sentido horario o antihorario. Este movimiento guarda relación con otros experimentos sobre formaciones aleatorias de puntos cinéticos de los que hablamos en esta sección en junio de 1980.



11. Dibujo creado por Alex Stewart Fraser



12. Dibujo de Fraser con una figura disimulada

Libros

Paleoantropología, ecología para ingenieros, Mulder y Liebig e interacciones específicas

B. Meléndez, A. Escarré, E. Portela y C. Giménez

Del Mono al Hombre. Un estudio sobre la Evolución Humana, por S. L. Washburn y Ruth Moore. Alianza Editorial; Madrid, 1986. Más que de una obra original, se trata de una recopilación de datos científicos, realizada por S. L. Washburn, debidamente articulados y presentados en forma amena por R. Moore.

Una parte muy importante del libro está dedicada a la documentación fósil de Primates, especialmente Homínidos. Desde las primeras páginas pone de manifiesto que el bipedialismo fue anterior al desarrollo del cerebro y a la fabricación de industrias líticas, como lo demuestran los hallazgos de huellas de un primate bípedo en Leatoli (Tanzania), datadas en más de tres millones de años.

El autor nos ofrece una historia muy detallada de los descubrimientos de Homínidos fósiles (australopitecos y hombres), en Africa austral y oriental, para llegar a la conclusión de que los australopitecos de tipo "grácil" (*Australopithecus africanus*) constituyen el tronco basal de los homínidos, del que posteriormente se separaron los de tipo "robusto" (*A. boisiei*) y los auténticos hombres, cuyo representante más antiguo sería el *Homo habilis*. Pone especial énfasis en haberse demostrado, por dataciones radiométricas precisas y por excavaciones realizadas con todo género de precauciones en las cuevas de Sterkfontein (Sudáfrica), que la famosa "pebble culture" denominada *olduwayense* no correspondía a los australopitecos, sino al *Homo habilis*. Todo parece confirmar que la secuencia evolutiva: *Primate bípedo* desconocido (huellas de Leatoli; 3,5 millones de años) — *Australopithecus afarensis* (de Afar, Sterkfontein y Makapán; 3 millones de años) — *Homo habilis* (primera industria lítica, olduwayense; 2 millones de años) — *Homo erectus* (industria acheulense; 1,2-0,6 millones de años) es la más probable en la ascendencia humana.

El único antecesor que parece posible para los Homínidos y los Póngidos es *Ramapithecus* (que vivió hace unos 10-15 millones de años). Ello acerca a una época relativamente reciente (10 millones como mucho) la separación de ambas líneas evolutivas.

En otro orden de ideas, el autor hace ver cómo los aportes de la biología molecular han proporcionado datos cuantitativos que son objetivos y ajenos a las comparaciones anatómicas, los cuales nos permiten establecer relaciones de parentesco entre el hombre y los póngidos, especialmente con el chimpancé y el gorila, que son los más próximos. Estos datos proceden del estudio de la estructura de las cadenas del ADN, cuyas analogías se cuantifican por la estabilidad térmica de las cadenas mixtas de ADN del hombre y los póngidos; proceden también del análisis de proteínas basado en las secuencias de aminoácidos que las forman y de la inmunología. Además, se ha comprobado, mediante electroforesis, que las proteínas del hombre y de los antropoides tienen cargas eléctricas muy próximas, del mismo orden de diferencia que muchas especies que siempre se han considerado afines.

Resumiendo: el hombre y el chimpancé compartirían más del 99 por ciento de su acervo genético y podrían considerarse como especies hermanas, que incluso estarían más estrechamente emparentadas entre sí que el caballo y la cebra o que el perro y el zorro. Además, la biología molecular ha permitido calcular, en forma aproximada, el tiempo transcurrido desde el momento en que se produjo la divergencia evolutiva; para el hombre, con respecto al chimpancé, sería de unos cinco millones de años.

Estos datos se resumen en esquemas filogenéticos, en los cuales, sin que se dé una explicación adecuada, se coloca la rama filética humana en posición lateral con relación a la de los chimpancés, que ocupa en ellos la posición central, de la que derivan por una parte los orangutanes y los gorilas y por otra los homínidos. Tal disposición parece sugerir que los homínidos derivarían del *phylum* que originó los chimpancés, cuando sería más lógico suponer que ha sido la *línea filética central* la que culmina en el hombre, que alcanza mayor grado de complejidad estructural y de libertad, y de la que se habrían separado, en etapas anteriores, los monos antropomorfos (orangután, gorila y chimpancé), que han quedado en niveles evolutivos más retrasados.

Una parte muy importante del libro está dedicada a resumir las numerosas observaciones recientes sobre el comportamiento y la bionomía de los antropoides actuales, especialmente del chimpancé y del gorila, que son los más próximos al hombre, buscando en ellos la clave para comprender el comportamiento de los Primates de finales del Plioceno, que fueron los antecesores de los Homínidos. En este terreno hay que proceder, sin embargo, con gran cautela, pues los antropoides actuales debieron evolucionar en sus costumbres y en su comportamiento, a la par que lo hicieron los Homínidos.

El primer problema que se plantea es el del bipedialismo. El autor llama la atención sobre el hecho de que las principales diferencias anatómicas entre el hombre y los antropoides no esté en la mayor longitud relativa de los brazos de éstos, sino en la mayor longitud del cuello en el hombre, que le permite una gran libertad de movimiento de la cabeza, y en la menor longitud de las piernas de los antropoides con relación al tronco, lo cual obliga, al gorila y al chimpancé, a caminar apoyándose en los nudillos de las manos, sin llegar a adoptar la posición bípeda que es propia de los Homínidos. Pero en esta posición se mueven con entera libertad sobre el suelo, donde pasan la mayor parte de su tiempo, ya que sólo en determinadas ocasiones trepan a los árboles; el orangután tiene un comportamiento distinto, porque es esencialmente arborícola.

Existe una gran analogía entre los movimientos de los brazos en el hombre y en los antropoides; por otra parte, éstos son capaces de ponerse de pie para otear el terreno, aunque no caminan mucha distancia sobre sus patas traseras.

Sugiere el autor la posibilidad de que, a la vista de estas observaciones, cuando los Primates antecesores de los actuales abandonasen el bosque, en busca de nuevos recursos para su alimentación, les resultaría provechoso caminar apoyándose en los nudillos ya que, por una parte, podían utilizar las manos (al menos una de ellas), para otras funciones, por ejemplo, para transportar una cría o algo de alimento, y, por otra parte, no habían perdido la

posibilidad de refugiarse en las ramas de un árbol, en caso de peligro ante un depredador.

En estas condiciones, las ventajas que supondrían la liberación de las manos de su función ambulatoria y el alargamiento de las extremidades posteriores, para otear mejor el horizonte en campo abierto, serían el factor determinante de la presión selectiva que habría conducido al bipedialismo integral, que caracteriza a los Homínidos (australopitecos y hombres). De esta forma, el caminar apoyándose en los nudillos, como el chimpancé, pudo ser una etapa evolutiva anterior a la consecución del bipedialismo. Sin embargo, queremos hacer notar que este razonamiento, sin duda sugestivo, se basa en el supuesto de que los antropoides han conservado sin alteraciones este comportamiento en la marcha.

Otro aspecto del comportamiento de los chimpancés concierne a su capacidad de manipulación, bien sea para conseguir alguna clase de alimentos o para su defensa o intimidación; aunque no son capaces de fabricar los instrumentos necesarios, sí lo son de escoger los más adecuados (palos, ramitas, piedras, etc.), por ejemplo, para sacar termites del interior de un termitero; esta nueva función de las manos debió contribuir también a la presión selectiva que condujo a la liberación de las extremidades anteriores, al tiempo que avanzaban en el bipedialismo. Y todo esto hubo de suceder cuando todavía el volumen del cerebro de los Primates a que nos venimos refiriendo era proporcionalmente análogo al de los antropoides actuales.

De esta forma se habría superado la primera etapa en el proceso de la hominización, del que nos ha quedado un documento excepcional, en las pisadas de Leatoli que, sin ninguna reserva, corresponde a un Primate definitivamente bípedo.

La etapa siguiente fue, sin duda, el aprendizaje en la manipulación de objetos (palos, huesos, piedras), para adecuarlos mejor a la función a que estaban destinados, lo cual supone un mayor desarrollo del cerebro en volumen y en complejidad estructural, que debió de producirse paralelamente al progreso en la vida social, lo cual facilitaría el mejor aprovechamiento de los recursos naturales, en especial de la caza y la protección ante los enemigos, los depredadores.

En cierto modo, la utilización de utensilios y de armas rudimentarias, resultado de la manipulación, fue sustituyendo gradualmente a las defensas naturales, en especial a los fuertes caninos de sus antepasados, que se irían reduciendo progresivamente. Este cambio de conducta lo encontramos ya en *Homo habilis*, autor de la "pebble culture", cuya antigüedad se remonta a casi 2 millones de años. Por otra parte, se desarrollaría la mano para así poder realizar la presa de precisión, independizándose ya definitivamente la línea evolutiva humana de la de los australopitecos.

Afirma el autor que la familia humana es una relación de individuos con funciones sociales, económicas y sexuales bien definidas. Las observaciones realizadas en los antropoides actuales demuestran que no es la conducta sexual lo que determina la configuración de sus sistemas sociales, sino más bien la dieta alimenticia y la locomoción, así como la protección al grupo por los machos, necesaria cuando se desplazan por el suelo.

Respecto a la conducta sexual de los antropoides, dice que en estos Primates se ha observado una amplia gama de posiciones para la copulación y que Savage-Rumbaugh ha demostrado que los chimpancés pigmeos también se aparean "cara a cara", por lo cual, la importancia que se ha dado a esta posición, como exclusivamente humana, en opinión del autor parece ser un "mito europeo" (*sic*), más que la causa biológica de la familia. En realidad, no se trata de ningún "mito", sino de una posición que viene impuesta por las condiciones anatómicas de la mujer, relacionadas con el bipedialismo, y distintas de las que presentan las hembras de chimpancé, como ha demostrado Bolk (1950). Lo más probable es que la observación de Savage haya sido mal interpretada.

No parece, a pesar de todo, que haya sido la conducta sexual lo que dio origen a la familia humana, aunque probablemente ha favorecido su estabilidad. Los factores nuevos que debieron condicionar la estructura familiar pudieron ser, más bien, el reparto de comida y la división del trabajo entre machos cazadores y hembras recolectoras, así como la maduración tardía de las crías, que precisan de atenciones maternas durante uno o dos años, mientras que en los antropoides no duran más de un par de meses. Estos factores dependen en gran medida del uso de instrumentos y armas, que son los indicios más antiguos de la existencia de un sistema social humano, los cuales corresponderían a la industria olduwayense, de la que parece ser autor el *Homo habilis*.

Hay que añadir la relación afectiva que se establece entre la madre y el hijo, consecuencia de su dependencia durante un período más largo, que luego se continúa con el aprendizaje, en el seno de la familia, para la caza y manipulación de instrumentos, para distinguir lo que se puede comer de lo que sería nocivo y, para las hembras, el aprendizaje para cuidar las crías antes de tener las suyas propias.

Los peligros de la endogamia en grupos reducidos se evitan cuando los adultos, principalmente los machos, abandonan la pandilla y buscan compañera en otra; esto se facilitaría en grupos de cazadores, que normalmente ocupan territorios próximos. Pretende el autor que las costumbres sociales sean adaptativas; extremo, por lo menos, opinable, pues en la evolución humana han intervenido otros factores psíquicos que hay que tener en cuenta.

El último capítulo aborda el estudio anatómico-funcional comparado del cráneo y de la región facial en el hombre y en los antropoides. El acortamiento de las mandíbulas viene condicionado por la reducción de la parte anterior de la dentición (dientes y caninos), que en los antropoides son de gran tamaño y desempeñan una función defensiva, mientras que en el hombre y en los australopitecos se emplean para cortar y masticar los alimentos. Esto se relaciona con el desarrollo de los músculos faciales y del cuello, que en los antropoides tienen amplias áreas de inserción en el cráneo, en el que existen crestas óseas dispuestas a tal fin, las cuales faltan en el hombre.

Si las dos primeras etapas de la hominización fueron el bipedialismo y la manipulación de instrumentos, las siguientes fueron la aparición del habla y la inteligencia, que permite relacionar causas y efectos.

El estudio del cerebro se puede llevar a cabo en los fósiles mediante los moldes endocraneales, que aproximadamente nos permiten conocer su estructura. Las regiones del cerebro que regulan estas actividades están situadas en la corteza cerebral, por lo que no dependen tanto de su volumen, como del desarrollo de las áreas correspondientes en el córtex, aunque existe una estrecha relación entre volumen y superficie de la corteza cerebral.

En la primera etapa de la hominización, que correspondió a los australopitecos de tipo "grácil", incluido el *Australopithecus afarensis*, el volumen del cerebro por la capacidad craneal no pasa de 500 cc; en el *Homo habilis* llega a 750 cc (umbral que generalmente se admite para el hombre), coincidiendo con la aparición de la industria lítica olduwayense, y en el *Homo erectus* llega

a los 1000 cc. Esto representa que, durante más de 2 millones de años, que corresponden al proceso de verticalización, el volumen del cerebro era análogo al de los antropoides, sin sobrepasar los 500 cc. En un período de 500.000 años a 1 millón, se duplicó el volumen hasta alcanzar los 1000 cc, coincidiendo con el desarrollo de la manipulación de instrumentos (industrias olduwayense y acheulense), y sólo en los últimos 100.000 años se produjo un cambio cualitativo en el hombre de Neanderthal, con un cerebro en el que, junto al aumento de volumen (hasta 1500 cc), se desarrollan las zonas del habla y de las actividades manuales.

Los antropoides pueden expresar estados emocionales y comunicarse mediante gritos, gestos y actitudes, pero su forma de comunicación es esencialmente distinta del habla humana, que es un fenómeno controlado por determinadas zonas del córtex; en los antropoides lo estaba por zonas primitivas del cerebro.

La aparición y desarrollo del habla ha sido esencial para la evolución humana que, de esta forma, ha podido tejer una vida social y desarrollar la inteligencia, incorporando así la evolución cultural que posibilitó la aparición de las técnicas, las artes y las ciencias, que son prerrogativas del hombre, quien se encuentra ahora ante el reto de resolver los problemas que le plantea el mundo de la cultura técnica moderna.

La traducción del libro, en su conjunto, es buena y la redacción en castellano fluida e incluso amena, pero contiene algunos errores: traducción de *billion years* por billones de años, en vez de miles de millones, que es lo correcto, o cuando se confunde, varias veces, "homínidos" por hombres (págs. 39, 138 y 146). *Physician* se traduce por físico, aplicado a los Drs. Dubois y Black (pág. 17), que eran médicos. Esto hay que achacarlo a la falta de una revisión del texto a cargo de un paleontólogo.

La edición del libro podría haber ganado si se hubiese empleado una calidad de papel que permitiese mejor reproducción de las fotografías; además, las citas de páginas suelen estar equivocadas y las explicaciones de las figuras 4.10 y 5.3, se hallan en la página contraria, lo que dificulta notablemente su interpretación. Esto también es consecuencia de falta de revisión del texto. (B. M.)

ECOLOGÍA PARA INGENIEROS. EL IMPACTO AMBIENTAL, por Santiago Hernández Fernández. Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos; Madrid, 1987. Los libros de ecología suelen tener estructuras y contenidos sorprendentemente similares, lo que, por lo menos, sirve de ayuda a los ecólogos para convencernos de que una ciencia tan general como ésta tiene, sin embargo, un "corpus" específico que no alcanza a ser explicado por las restantes disciplinas que estudian la naturaleza. Con esa autonomía, la ecología pretende conseguir cierto nivel de respetabilidad entre otras ciencias naturales menos integradoras.

Tal y como indica en la introducción F. González Bernáldez, este texto se aleja bastante de los usuales, quizá no tanto por los contenidos como por su enfoque. De hecho, lo que la mayoría de los libros de ecología tratan "in extenso" está aquí comprimido en los tres primeros capítulos, que vienen a representar sólo la tercera parte de la obra. La porción mayor (capítulos 4 y 5) está dedicada a las alteraciones que la actividad humana produce, especialmente los efectos negativos que pueden originar las denominadas obras de ingeniería. Como un complemento a los dos anteriores, el capítulo 6 expone, de forma breve, algunos de los métodos creados para la evaluación del impacto ambiental ocasionado por aquéllas. En los dos últimos capítulos se dan, respectivamente, una brevísima valoración del movimiento ecologista y una transcripción de la legislación comunitaria y nacional de mayor transcendencia en relación con la temática del libro.

El enfoque de esta *Ecología para ingenieros* es el de un técnico que tiene, además, una buena formación naturalista y una clara vocación ecologista. En apariencia, un objetivo primordial del libro es el de dar a conocer, muy en especial a los técnicos, que las acciones poco meditadas sobre el medio natural pueden tener repercusiones imprevistas y graves. Con notable frecuencia insiste el autor en que los conocimientos básicos existentes sobre los procesos ecológicos suelen ser escasos y fragmentarios, lo que en su opinión representa el mayor argumento en favor de un especial cuidado cuando el hombre se entromete en el funcionamiento de la naturaleza.

El libro aparece en un momento oportuno. La normativa del Consejo de Europa del año 1985, que se recoge en el decreto 1302/196 de 28 de junio, entrará en vigor en esta misma fecha del año 1988. A partir de entonces, buena parte de proyectos de obras, instalaciones u otras actividades requerirán una evaluación previa del impacto que presumiblemente vayan a producir en el medio. Con la vigencia de esta nueva legislación es previsible una fuerte demanda de profesionales que sean capaces de llevar a cabo, de un lado, los estudios de impacto sobre el medio ambiente, y de otro, de juzgar desde la administración el rigor y fiabilidad de los mismos.

Pero si hoy las circunstancias son favorables para la acogida de este libro, se asiste también a una polémica que su aparición, en cierta manera, reaviva. En un país algo corporativista (valga el eufemismo) como el nuestro, las apetencias de exclusivismos en temática ambiental son múltiples, aunque quedan resumidas en la disyuntiva planteada en la acuñación de nuevos estudios de ciencias y tecnologías del medio ambiente reivindicados desde las facultades universitarias y desde las escuelas politécnicas.

En este aspecto, el autor reitera algo en lo que todo el mundo parece estar de acuerdo y es en la necesidad de equipos pluridisciplinares en los que técnicos y científicos se complementen en vez de excluirse. La formación de "generalistas", que es lo que vendrían a ser los técnico-científicos del medio ambiente, es lo que resulta polémico, más desde el punto de vista de los límites de su marco profesional que desde la definición de un perfil flexible de experto, con suficiente dominio de los temas fundamentales de geofísica y procesos biológicos.

Santiago Hernández propone que en los grupos multidisciplinares sean los técnicos —debidamente "concienciados"— los integradores. Pienso que es prematuro hablar de una tecnología de los ecosistemas. Los sistemas ecológicos son casi siempre muy complejos, difícilmente describibles por modelos matemáticos determinísticos sencillos, tan extendidos en el quehacer técnico cotidiano. Los métodos de evaluación de impactos son, en su mayoría, muy descriptivos y rara vez permiten integrar variables en una simulación del proceso que consiga previsiones fiables. Queda, sin duda, un camino por recorrer para el que es importante que todos los que investigan o trabajan sobre los ecosistemas tengan continuos intercambios de información en lenguajes lo más generales posibles. En este sentido, resulta algo sorprendente la total ausencia de expresiones en lenguaje matemático, tan al uso en los textos actuales de ecología, máxime cuando el autor proviene de uno de los centros más reputados en exigir un gran dominio de las matemáticas. Abrigo por ello mis temores de que, con un

texto como éste, la ecología pueda ser considerada por los ingenieros algo así como una deontología de la relación con el medio natural, más que como una ciencia. A mi juicio, ha faltado insistir en la importancia que modelos matemáticos más complejos tienen para la previsión de las interferencias humanas en el intrincado funcionalismo de los ecosistemas.

Por último, hay algunas erratas que hubiera valido la pena reseñar, en una impresión a dos columnas, sin ajuste de márgenes, que resulta un tanto desconcertante. Las fotografías en color son, sin embargo, de calidad. (A. E.)

THE LETTERS FROM GERRIT JAN MULDER TO JUSTUS LIEBIG (1838-1846). H. A. M. Snelders. Amsterdam; Rodopi, 1986. En cada época y en cada disciplina científica, la constelación de quienes la cultivan está formada por una estructura piramidal en cuya cúspide se sitúan unas pocas figuras de primera magnitud; hacia la base, el número de científicos crece notablemente. Esta estructura plantea problemas de gran interés a la sociología de la ciencia, entre los cuales podríamos apuntar: los caracteres que consagran a las grandes figuras dentro de la comunidad científica; la distribución numérica de científicos en los distintos estratos; las relaciones entre científicos de los diversos estratos, etcétera.

La obra que nos ocupa recoge fundamentalmente la correspondencia dirigida por Gerardus Johannes Mulder (1802-1880), un científico de los estratos intermedios, a Justus von Liebig (1803-1873), una de las figuras destacadas, en la que resulta implicado de forma central Jöns Jacob Berzelius (1779-1848), personalidad de valoración análoga a la de Liebig.

Fue Mulder médico por profesión y químico por dedicación. Aunque inicialmente enseñó botánica en Rotterdam, desde 1828 amplió su tarea docente a la química, planteándose como objetivo primordial la formación práctica de sus alumnos, lo que consiguió con el montaje de un laboratorio excelente. En el nombramiento de Mulder como profesor de química en Utrecht pesaron los buenos oficios de Berzelius, Faraday y Liebig; este traslado a su ciudad natal confirmó la reputación de Mulder y afianzó la labor investigadora que venía realizando. Fue promotor de diversas revistas en las que publicó la mayor parte de su producción científica, lo mismo en holandés que en francés.

Las relaciones de Mulder con Berzelius se iniciaron cuando bajo su supervisión unos discípulos suyos tradujeron al holandés el célebre compendio de química de Berzelius. A partir de dicho contacto se desarrolló una amistosa correspondencia, que por cierto fue publicada en Upsala en 1916, en la que Mulder recibió múltiples sugerencias y consejos. Pese a que Mulder pasa por ser quien propuso por vez primera el término "proteína", todo parece indicar que le fue sugerido por Berzelius en 1838.

La relación con Liebig tuvo su origen en la solicitud que éste hizo a Mulder para que mediara en el envío de un lote de libros que se encontraba retenido en Rotterdam. Mulder aprovechó esta circunstancia para establecer una correspondencia científica con tan destacada personalidad, que se mantuvo a lo largo del período 1838-1846. La obra que comentamos recoge los textos de las 19 cartas que Mulder dirigiera a Liebig; por desgracia no incluye las respuestas de éste, si bien se puede seguir cuanto menos el tenor de las mismas.

La lectura del libro es rica en sugerencias.

En un primer plano, permite seguir el curso de las investigaciones de Mulder, su intento por adentrarse en un mundo imposible para los conocimientos químicos de la época: la química de las proteínas. Tras sus primeros estudios estableció una teoría, basada en el sistema de radicales propugnado por Jean Baptiste Dumas (1800-1884), según la cual las sustancias albuminosas constarían de un radical de proteína (compuesta de carbono, oxígeno, nitrógeno e hidrógeno), unido a cantidades variables de fósforo y azufre. Las posibilidades analíticas de la época condujeron a Mulder a fórmulas muy complejas para las proteínas, con una propuesta inicial de $C_{40}\,H_{31}\,N_5\,O_{12}$ que más tarde pasó a ser $C_{36}\,H_{25}\,N_4\,O_{10}$. Estas fórmulas se establecían mediante un método analítico sencillo propuesto por Berzelius, que partía de la mezcla de la sustancia orgánica con óxido de plomo y posterior calentamiento con óxido de cobre; el azufre y el fósforo quedaban así en el residuo en forma de sales insolubles. Tanto el azufre como el fósforo fueron considerados inicialmente como impurezas.

Los resultados y conclusiones de Mulder no podían establecer fórmulas correctas, pero al menos sirvieron para reconocer la identidad y analogías de un grupo de sustancias de alto interés en fisiología. Los primeros resultados de Mulder fueron muy bien acogidos por Berzelius y Liebig. El químico sueco, no obstante, estaba convencido de que análisis más precisos conducirían a fórmulas más sencillas. Por su parte, Liebig inició con sus discípulos investigaciones en la misma línea y aunque en un principio alcanzó resultados análogos a los de Mulder, y así lo manifestó, no tardó en reconocer que fósforo y azufre eran constituyentes esenciales de las proteínas.

Éste es el discurso científico que las cartas de Mulder a Liebig plantean. Pero hay en ellas un segundo plano que puede superar en interés al primero y es precisamente la aproximación a la personalidad de los cultivadores de la ciencia. La frialdad del artículo científico se ve desbordada en la correspondencia personal y de este modo podemos seguir las crecientes desavenencias entre Mulder y Liebig, cuando este último comenzó a discrepar de las conclusiones del primero. La inicial veneración fue adquiriendo tintes agrios hasta degenerar en disputa abierta, científica y personal. Como telón de fondo, la ruptura de relaciones entre Berzelius y Liebig, provocada por las duras críticas del alemán a las investigaciones de Berzelius sobre la bilis. El seguimiento de estas polémicas, planteadas en numerosos frentes (metodológicos, epistemológicos y personales), constituye un sano acercamiento a la desmitificación de la ciencia y de sus figuras más excelsas.

La correspondencia entre científicos merece una atención mayor por parte de historiadores y sociólogos de la ciencia. De su estudio interno de la ciencia, a la existencia real de "colegios invisibles" y a la propia personalidad de los científicos. La correspondencia de Liebig, por ejemplo, compuesta por más de 7500 cartas emitidas o recibidas, contiene sin duda un volumen de información mayor (y más matizada) que toda su obra impresa. Aun cuando hoy haya sido prácticamente desplazada por las nuevas posibilidades y hábitos de la comunicación, debe estimarse en su justo valor la transcendencia de la correspondencia como vehículo de la información científica.

Una última reflexión a propósito del idioma. Esta obra pone de manifiesto que Mulder actuó de forma responsable en este decisivo tema. En cuanto al holandés, tradujo a su idioma obras esenciales para la difusión y aplicación de los conocimientos químicos de la época; escribió numerosos trabajos en su idioma natal y editó revistas científicas tanto en holandés como en francés, la *lingua franca* de su tiempo. En condición de tal, hizo uso de este segundo idioma para dar a conocer a la comunidad científica internacional los resultados de sus estudios. Con este

comportamiento, Mulder contribuyó a mantener la validez de su idioma como lenguaje científico y a garantizar un buen nivel de conocimientos en su propio país. Mediante el empleo del francés garantizó igualmente la circulación de sus aportaciones. La renuncia al idioma propio lleva consigo un empobrecimiento del idioma y una depauperación cultural del país en que se habla. Si la preponderancia del francés como idioma científico de la primera mitad del siglo XIX hubiera sido aceptada como fatal por la comunidad científica, con dejación de los idiomas autóctonos, nunca se hubieran producido los sucesivos relevos del alemán y del inglés. Como dice el saber popular, el mundo da muchas vueltas y cada palo debe aguantar su vela. Nadie puede saber qué nos (les) deparará la historia.

Por último, es obligado reconocer el exquisito esmero que H. A. M. Snelders ha puesto en la edición de la obra, con una introducción concisa pero altamente ilustrativa y unas notas que reflejan gran erudición y dominio del tema, dando lugar a un resultado de gran profesionalidad. La presentación de la obra está muy cuidada, como es habitual en los suplementos de *Janus*. Si acaso hubiera que plantearle algún reparo, consistiría éste en anotar la dificultad que supone el hecho de que las cartas figuren en francés, la introducción en inglés y las citas en holandés o alemán; una posible edición castellana debería respetar las transcripciones, pero facilitando la oportuna traducción. (E. P.)

SPECIFICITY IN BIOLOGICAL INTERACTIONS. PROCEEDINGS OF A WORKING GROUP AT THE PONTIFICIAL ACADEMY OF SCIENCES. Dirigido por C. Chagas y B. Pullman. D. Reidel Publishing Company; Dorchecht, 1984. Nos encontramos con un libro interesante, donde se aborda el estudio de las interacciones macromoleculares, incluidas las relativas a los polímeros ADN-ADN, ADN-proteína, la estructura y especificidad de anticuerpos y la especificidad ionóforo-catión.

El entendimiento de las funciones biológicas que las proteínas y el ADN desempeñan en los sistemas vivos crece con el refinamiento de métodos que permiten determinar la secuencia y conformación de determinados segmentos del ADN, con el dominio de técnicas más complejas de clonaje y expresión de genes específicos, con la producción *in vitro* de determinadas proteínas y con la posibilidad de cristalizar macromoléculas DNP cromosómicas, RNP extracromosómicas y complejos proteína-proteína. El poder sustituir grupos definidos en el ADN (mediante mutagénesis dirigida) o proteínas (mediante síntesis química) y analizar en los sustituyentes la especificidad de unión ha contribuido a delimitar la relación estructura-actividad.

Quizás una de las preguntas más importantes sea la de saber cuál es la mecánica de reconocimiento entre los campos energéticos, o estructuras electrónicas en el espacio, que van a estar definidos por los componentes atómicos de las macromoléculas. De hecho, tal pregunta constituye uno de los problemas fundamentales de la biología molecular. Su resolución permitirá conocer los mecanismos de regulación genética y los mecanismos más complejos que tienen lugar en la generación de las formas (morfogénesis).

Los reconocimientos entre moléculas que forman complejos DNP han de estar dictados por interacciones específicas tales como uniones de hidrógeno, uniones electrostáticas e hidrofóbicas entre las bases del ADN y los aminoácidos de las proteínas y los puentes salinos entre grupos cargados (fosfatos, lisinas, argininas, histidinas). Sin embargo, las variaciones y fluctuaciones que producen heterogeneidad en la conformación, tanto en el ADN como en proteínas, han de intervenir con un papel preponderante en la determinación del tipo de especificidad en la unión entre ligandos.

D. J. Patel y colaboradores indican que la conformación local y dinámica del ADN en solución, dependiente de la secuencia de nucleótidos, influirá preponderantemente en la cinética y especificidad entre ligandos. Sin embargo, a pesar de que se han aislado numerosos complejos ADN-proteína y se ha determinado la secuencia de nucleótidos y aminoácidos en tales complejos, no existe una regla simple que permita realizar ninguna predicción sobre los factores involucrados en el reconocimiento.

Las comunicaciones sobre "Especificidad en las reacciones biológicas" ponen de manifiesto que el problema de la formación de complejos estables y biológicamente significativos entre moléculas parece centrarse en el hecho de que el ambiente electrónico de las macromoléculas que interaccionan ha de ser el adecuado o suficiente para que el reconocimiento pueda producirse. Si no es el adecuado, o no se producirá el reconocimiento o se habrán de introducir desde fuera del sistema las condiciones necesarias para que, una vez modificado el ambiente electrónico de los ligandos, acontezca tal reconocimiento. A. R. Fersht muestra que, si se modifican determinados residuos en la tirosina-ARN_t sintetasa, que por estudios cristalográficos sabemos que interaccionan con el substrato, no sólo se podrá medir la diferencial de las fuerzas de las interacciones resultantes sino que deberá analizarse en términos de un proceso de intercambio con el solvente.

El problema de la interacción macromolecular se centra, pues, en la selectividad, complementariedad, identidad o diversidad estructural de elementos flexibles y dinámicos medibles en términos temporales de picosegundos (M. Levitt). No parece que se pueda descartar que, aunque el reconocimiento entre ligandos parezca ser de naturaleza local, dependa de la estructura macromolecular total de los polímeros B. Pullman pone de manifiesto que el factor definido por el potencial electrostático de las moléculas, bien de forma local o total, parece ser el principal elemento regulador de la especificidad de las interacciones biológicas. Especial interés reviste el capítulo escrito por Y. A. Orcinnikov en relación a la especificidad de las interacciones ionóforo-catión en las que de una forma clara y con profundidad aborda el estudio de las bases moleculares del transporte iónico a través de las membranas.

El análisis de la especificidad de unión entre el antígeno y el anticuerpo puede ayudar en la búsqueda de modelos estructurales en la interacción. David R. Davies indica cuál es la estructura tridimensional de dos anticuerpos de ratón *Fabs* y explica que las bases moleculares de la unión de fosforilcolina a uno de los anticuerpos Fabs-M603 se puede entender en términos de las cadenas laterales de los aminoácidos con las que entra en contacto. Uno de los mecanismos propuestos para dar cuenta de la señalización o activación de los elementos efectores de un anticuerpo o un antígeno apela a la producción de cambios alostéricos en el antígeno. Tales cambios pueden detectarse por la introducción de cambios en la estructura cristalina del antígeno. El autor del capítulo opina que la generalización sobre la estructura del anticuerpo y de la unión con el antígeno puede ser la base de la construcción de modelos de interacción macromolecular.

Cada uno de los capítulos del libro es de interés para especialistas en sistemas. En su conjunto, representa, a mi entender, la oportunidad, no muy frecuente, de ver una parte importante de conocimiento actual en interacciones entre macromoléculas. (C. G.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

EL AGUJERO DE OZONO DE LA ANTARTIDA

NIMBUS 7 SATELLITE MEASUREMENTS OF THE SPRINGTIME ANTARCTIC OZONE DECREASE. R. S. Stolarski, A. J. Krueger, M. R. Schoeberl, R. D. McPeters, P. A. Newman y J. C. Alpert en *Nature*, vol. 322, n.° 6082, págs. 808-811; 28 de agosto de 1986.

ANTARCTIC OZONE DEPLETION. En *Geophysical Research Letters*, vol. 13, n.° 12; suplemento de noviembre, 1986.

STRATOSPHERIC TRACE GASES IN THE SPRING 1986 ANTARCTIC ATMOSPHERE. C. B. Farmer, G. C. Toon, P. W. Schaper, J.-F. Blavier y L. L. Lowes en *Nature*, vol. 329, n.° 6135, págs. 126-130; 10 de septiembre de 1987.

CELULAS ASESINAS

MECHANISM OF LYMPHOCYTE-MEDIATED CYTOTOXICITY. Pierre A. Henkart en *Annual Review of Immunology*, volumen 3, págs. 31-58; 1985.

MOLECULAR MECHANISM OF LYMPHOCYTE MEDIATED TUMOR LYSIS. Eckhard R. Podack en *Immunology Today*, vol. 6, págs. 21-27; 1985.

PURIFICATION AND CHARACTERIZATION OF A CYTOLYTIC PORE-FORMING PROTEIN FROM GRANULES OF CLONED LYMPHOCYTES WITH NATURAL KILLER ACTIVITY. John Ding-E Young, Hans Hengartner, Eckhard R. Podack y Zanvil A. Cohn en *Cell*, vol. 44, n.° 6, págs. 849-859; 28 de marzo de 1986.

A CALCIUM- AND PERFORIN-INDEPENDENT PATHWAY OF KILLING MEDIATED BY MURINE CYTOLYTIC LYMPHOCYTES. John Ding-E Young, William R. Clark, Chau-Ching Liu y Zanvil A. Cohn en *The Journal of Experimental Medicine*, vol. 166, n.° 6, págs. 1894-1899; diciembre, 1987.

REALIDAD DEL MUNDO CUANTICO

FOUNDATIONS OF QUANTUM MECHANICS IN THE LIGHT OF NEW TECHNOLOGY. Dirigido por S. Kamefuchi, H. Ezawa, Y. Murayama, M. Namiki, S. Nomura, Y. Ohnuki y T. Yajima. Physical Society of Japan, 1984.

THE QUANTUM WORLD. J. C. Polkinghorne. Princeton University Press, 1985.

QUANTUM PHYSICS: ILLUSION OR REALITY? Alastair I. M. Rae. Cambridge University Press, 1986.

PLASTICIDAD SINAPTICA

BRAIN FUNCTION, SYNAPSE RENEWAL AND PLASTICITY. Carl W. Cotman y Manuel Nieto-Sampedro en *Annual Review of Psychology*, vol. 33, págs. 371-401; 1982.

SYNAPTIC PLASTICITY IN THE RED NUCLEUS AND ITS POSSIBLE BEHAVIORAL CORRELATES. Nakaakira Tsukahara en *Synaptic Plasticity* (editor, C. W. Cotman), Guilford Press, New York, págs. 201-229; 1985.

GROWTH FACTOR INDUCTION AND TEMPORAL ORDER IN CNS REPAIR. Manuel Nieto-Sampedro y Carl W. Cotman en *Synaptic Plasticity* (editor, C. W. Cotman), Guilford Press, New York, págs. 407-455; 1985.

REVERSIBLE SYNAPSE FORMATION AND MODULATION OF CELLULAR RELATIONSHIPS IN THE ADULT HYPOTHALAMUS UNDER PHYSIOLOGICAL CONDITIONS. Glenn I. Hatton en *Synaptic Plasticity* (editor, C. W. Cotman), Guilford Press, New York, págs. 373-404; 1985.

LONG-TERM POTENTIATION. T. J. Teyler y P. DiScenna en *Annual Review of Neuroscience*, vol. 10, págs. 131-161; 1987.

PECES INTERMAREALES

INTERTIDAL FISHES: LIFE IN A FLUCTUATING ENVIRONMENT. Robin N. Gibson en *The Behavior of Teleost Fishes*, dirigido por Tony J. Pitcher. The Johns Hopkins University Press, 1986.

HERBIVORE RESPONSES TO A SEASONALLY FLUCTUATING FOOD SUPPLY: GROWTH POTENTIAL OF TWO TEMPERATE INTERTIDAL FISHES BASED ON THE PROTEIN AND ENERGY ASSIMILATED FROM THEIR MACROALGAL DIETS. Michael H. Horn, Margaret A. Neighbors y Steven N. Murray en *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, vol. 103, n.° 1, 2, 3, págs. 217-234; 16 de diciembre de 1986.

TIERRAS NO TAN RARAS

RARE EARTH ELEMENT GEOCHEMISTRY. Dirigido por Paul Henderson. Elsevier North-Holland Company, 1984.

THE CONTINENTAL CRUST: ITS COMPOSITION AND EVOLUTION. Stuart Ross Taylor y Scott M. McLennan. Blackwell Scientific Publications, 1985.

ARTE, ILUSION Y SISTEMA VISUAL

FUNCTIONAL ARCHITECTURE OF MACAQUE MONKEY VISUAL CORTEX. D. H. Hubel y T. N. Wiesel en *Proceedings of the Royal Society of London, Series B*, vol. 198, n.° 1130, págs. 1-59; julio, 1977.

ANATOMY AND PHYSIOLOGY OF A COLOR SYSTEM IN THE PRIMATE VISUAL CORTEX. Margaret S. Livingstone y David H. Hubel en *The Journal of Neuroscience*, vol. 4, n.° 1, págs. 309-356; enero, 1984.

EYE, BRAIN, AND VISION. D. H. Hubel. Scientific American Library, 1988.

EL TRANSFORMADOR

THE RISE OF THE ELECTRICAL INDUSTRY DURING THE NINETEENTH CENTURY. Malcolm MacLaren. Princeton University Press, 1943.

HISTORY OF SOFT MAGNETIC MATERIALS. J. H. Bechtold y G. W. Wiener en *The Metallurgical Society Conferences: vol. 27*, dirigido por Cyril Stanley Smith. Gordon & Breach Science Publishers, 1965.

JUEGOS DE ORDENADOR

MOLECULAR ENGINEERING: AN APPROACH TO THE DEVELOPMENT OF GENERAL CAPABILITIES FOR MOLECULAR MANIPULATION. K. Eric Drexler en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 78, n.° 9, págs. 5275-5278; septiembre, 1981.

ENGINES OF CREATION. K. Eric Drexler. Anchor Press, 1986.

TALLER Y LABORATORIO

SUN FIGURE: AN ILLUSORY DIFFUSE CONTOUR RESULTING FROM AN ARRANGEMENT OF DOTS. John M. Kennedy en *Perception*, vol. 5, págs. 479-481; 1976.

THE EFFECTS OF PERCEPTUAL SET ON THE SHAPE AND APPARENT DEPTH OF SUBJECTIVE CONTOURS. Stanley Coren, Clare Porac y Leonard H. Theodor en *Perception & Psychophysics*, vol. 39, n.° 5, págs. 327-333; 1986.